



MENTION BIOLOGIE GEOSCIENCES AGRORESSOURCES ENVIRONNEMENT
MASTER GESTION EVALUATION DES RESSOURCES EN EAU (GERE)

MEMOIRE DE STAGE DE 2^{EME} ANNEE



UPR
Systèmes bananes
et ananas

Etienne MOREAU

Maître de stage :
François COLIN
Co-encadrant :
Philippe CATTAN

Mars à septembre 2008

TABLE DES MATIERES

PARTIE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE _____ 5

Présentation et situation géographique de la Guadeloupe _____ 5

Contexte climatique _____ 7

Contexte géologique _____ 8

1) L'ensemble Matélie – Piton de Bouillante : _____ 8

2) L'ensemble Massif de la Madeleine : _____ 8

3) L'ensemble « volcano-sédimentaire anté-Miocène » : _____ 8

Pédologie _____ 9

1) Les sols à allophanes (andosols) : _____ 9

2) Les sols argileux à halloysite: _____ 10

Contexte hydrographique _____ 11

1) du massif de la Madeleine ou de la Soufrière : _____ 11

2) du Matélie, du Grand-Sans-Toucher, du Carmichael et de la montagne de Capesterre : _____ 11

3) ou des mornes plus au nord : _____ 11

Occupation du sol et mode de cultures _____ 13

1) la canne à sucre : _____ 13

2) la banane : _____ 13

3) diversification : fruits, légumes, horticulture : _____ 13

Problématique de la pollution par la chlordécone _____ 16

PARTIE 2 : MODELISATION DU BASSIN DE CAPESTERRE-PEROU _____ 18

Présentation du Modèle SWAT _____ 18

Collecte des données d'entrée du modèle SWAT _____ 19

1) Topographie _____ 19

2) Hydrographie _____ 19

3) Pédologie _____ 19

4) Occupation du sol et cultures _____ 21

5) Données climatiques _____ 22

Mise en œuvre du modèle SWAT _____ 26

1) Discrétisation spatiale _____ 26

2) Intégration des données sol et occupation du sol _____ 27

3) Distribution des HRU _____ 28

4) Intégration des données climatiques _____ 29

5) Intégration des données complémentaires (pratiques agricoles) _____ 30

Simulation _____ 32

Calibration du modèle _____ 33

1) Analyse de sensibilité _____ 33

2) Calibration des débits _____ 34

3) Résultats _____ 34

Validation du modèle _____ 39

1) Validation temporelle _____ 39

2) Validation spatiale _____ 40

Modélisation des transferts de nitrates et chlordécone	41
1) Modélisation des transferts de nitrates	41
2) Modélisation des transferts de chlordécone	42
LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX	44
BIBLIOGRAPHIE	45

PARTIE 1 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Présentation et situation géographique de la Guadeloupe

Les Petites Antilles, chapelet d'îles qui constituent la limite orientale de la Mer des Caraïbes qu'elles séparent de l'Océan Atlantique, sont disposées sur deux alignements. L'arc externe (du nord au sud : Anguilla, Saint-Martin, Saint-Barthélemy, Antigua, La Grande-Terre de Guadeloupe, Marie-Galante et la Désirade, Barbade, Trinidad et Tobago) est à prédominance calcaire, de relief faible et parfois arasé. L'arc interne (du nord au sud : les Leewards occidentales, la Basse-Terre de Guadeloupe et les Saintes, la Dominique; La Martinique, Sainte-Lucie, Saint-Vincent, Grenade et les Grenadines) est à prédominance volcanique avec de hauts reliefs dus principalement aux éruptions quaternaires. L'exposition de ces deux chapelets d'îles aux vents d'est dominants (les Alizés) et l'intervention des reliefs expliquent les différences climatiques très sensibles qu'on y observe : faible pluviométrie sur les îles calcaires peu élevées, versants « au vent » (est) très arrosés des îles volcaniques, versants « sous le vent » (ouest) des mêmes îles où la pluviométrie décroît rapidement.

La Guadeloupe, à la jonction des deux arcs (Figure 1), occupe ainsi une situation exceptionnelle qui justifie l'intérêt scientifique de l'étude de ses différents régimes hydropluviométriques.



Figure 1: Plan de situation de la Guadeloupe et des Antilles

Le département français de Guadeloupe est une entité administrative (D.O.M.) qui regroupe un archipel (Basse-Terre, Grande-Terre, Marie Galante, La Désirade et Les Saintes) situé dans le tiers septentrional des Petites Antilles (entre Antigua et La Dominique) et deux petites îles (Saint-Martin, dont la France administre la partie nord, et Saint-Barthélemy) situées plus au nord.

L'ensemble guadeloupéen proprement dit a pour limites :

au nord 16°31' N. Pointe de la Grande Vigie (Grande -Terre),
au sud 15°50' N. Le Grand Ilet (Saintes),
à l'est 61°00' O. Pointe du Grand Abaque (Désirade) ,
à l'ouest 61°48' O. Pointe Ferry (Basse-Terre).

La superficie de l'ensemble guadeloupéen est de 1 780 km². Les deux îles principales (Basse-Terre ou Guadeloupe proprement dite et Grande-Terre), qui ne sont séparées que par un étroit chenal maritime (La Rivière Salée) réunissant le Grand et le Petit Cul de Sac Marin, représentent 85% de cette superficie.

La Basse-Terre (950 km²) s'inscrit dans une ellipse de direction principale NNO-SSE. Sa longueur est d'environ 46 km pour une largeur moyenne de 21 km (27 dans sa plus grande largeur). La majeure partie de l'île est occupée par une chaîne montagneuse d'origine volcanique dont l'axe nord-sud est déjeté vers l'ouest. Cette

cordillère offre un profil dissymétrique : un versant occidental abrupt sur le littoral Caraïbe, et un versant oriental plus adouci qui se prolonge vers le nord-est par une zone de Piémont et une pénéplaine large de 5 à 10 km. Bien que la chaîne ne présente pas de discontinuités bien marquées, on peut y distinguer trois ensembles d'altitude croissante du nord au sud :

Entre la Pointe Allègre et le Col des Mamelles (au centre de la chaîne), une dorsale ancienne érodée, jalonnée de sommets qui ne dépassent pas 800 m d'altitude. Cette dorsale est doublée, vers l'ouest, de pitons isolés.

Entre les Mamelles et Capesterre, un ensemble plus massif qui s'aligne sur un axe NW-SE : Pitons de Bouillante (1 088 m), Cirque du Mateliane occupé en son centre par le Grand Sans-Toucher (1 354 m) et le Petit Sans-Toucher (1 318 m), et au sud-est, la montagne de Capesterre (1 134 m).

Enfin, dominant la zone méridionale, le massif éruptif récent de la Soufrière regroupe un ensemble de dômes volcaniques : Soufrière (1 467 m), Carmichael, Puy de la Citerne, auxquels s'ajoute le massif de la Madeleine.

La population est aujourd'hui évaluée à 422 000 habitants, soit une densité de 250 habitants/km². La pression démographique est concentrée sur le littoral, le long des routes et autour de l'agglomération pointoise. Le développement de l'urbanisation est donc un phénomène majeur. En effet entre 1992 et 1997, le recul des zones agricoles et naturelles dans les POS a atteint près de 5 % et les zones urbaines ont augmenté de 18 %. De plus sur le littoral, la domanialité de la zone des 50 pas géométriques ne représente pas un frein à la construction : près de 20 % de la surface de cette zone serait occupée sans droit de propriété.

Les secteurs économiques qui ont joué et joueront un rôle fondamental pour la Guadeloupe sont l'agriculture et le tourisme.

Située au centre de la Côte-au-Vent de Basse-Terre, Capesterre-Belle-Eau tient son origine étymologique d'une expression marine « cab à terre » c'est-à-dire terre exposée aux vents d'est, à laquelle a été ajouté le complément belle eau qui souligne la présence importante de cet élément naturel. De nombreuses rivières, chutes et cascades s'éparpillent sur cette commune, en faisant de cet endroit l'un des plus prisés par les touristes. La plus célèbre de toutes ses chutes est celle du Carbet parmi les plus belles des petites Antilles. Capesterre-Belle-Eau est l'une des plus grandes communes de Guadeloupe (plus de 100 km²). Son littoral s'étend sur 17 km entre Trois-Rivières et Goyave. Capesterre-Belle-Eau constitue le passage obligé entre la ville administrative de Basse-Terre et la ville commerciale de Pointe-à-Pitre. S'étalant vers la soufrière, la commune offre des paysages et des sites exceptionnels.

Contexte climatique

La variabilité spatiale et temporelle du régime des précipitations imposé par la morphologie des îles, l'échelle et la fréquence des perturbations atmosphériques constituent la principale particularité du climat tropical maritime insulaire de la Guadeloupe, avec deux saisons principales plus ou moins bien marquées d'une année sur l'autre :

- l'hivernage de juin à novembre : il s'agit de la saison chaude et humide ; la saison des pluies (surtout d'août à novembre), avec des intensités pluviométriques très fortes, potentiellement génératrices d'inondations et de glissements de terrain (Il est important de noter que des pluies intenses, également potentiellement génératrices de crues et mouvements de terrain, peuvent cependant survenir pendant le carême.). C'est aussi la saison des cyclones appelés ici ouragans, qui sont caractérisés par des vents violents dévastateurs, des pluies torrentielles sources d'inondations catastrophiques, une élévation du niveau de la mer et une forte houle pouvant causer des dégâts très importants sur la côte
- le carême de décembre à mai : il s'agit de la saison fraîche et sèche, pendant laquelle les alizés sont bien établis.

Contrairement à la Grande Terre et aux îles, qui connaissent régulièrement de sévères sécheresses, le relief de la Basse Terre régule le régime des pluies : la pluviométrie montre une dissymétrie orographique (Figure 2) marquée entre les versants est « au vent » et ouest « sous le vent ». Cette dissymétrie est due à l'orientation du relief perpendiculaire au flux des alizés (provenant du secteur est principalement).

La Commune de Capesterre-Belle-Eau est située dans la zone de pluviométrie importante de la Basse Terre, sur la côte au vent : la pluviométrie annuelle est élevée et s'élève avec l'altitude, de 2000mm en bord de mer à plus de 5000mm en montagne.

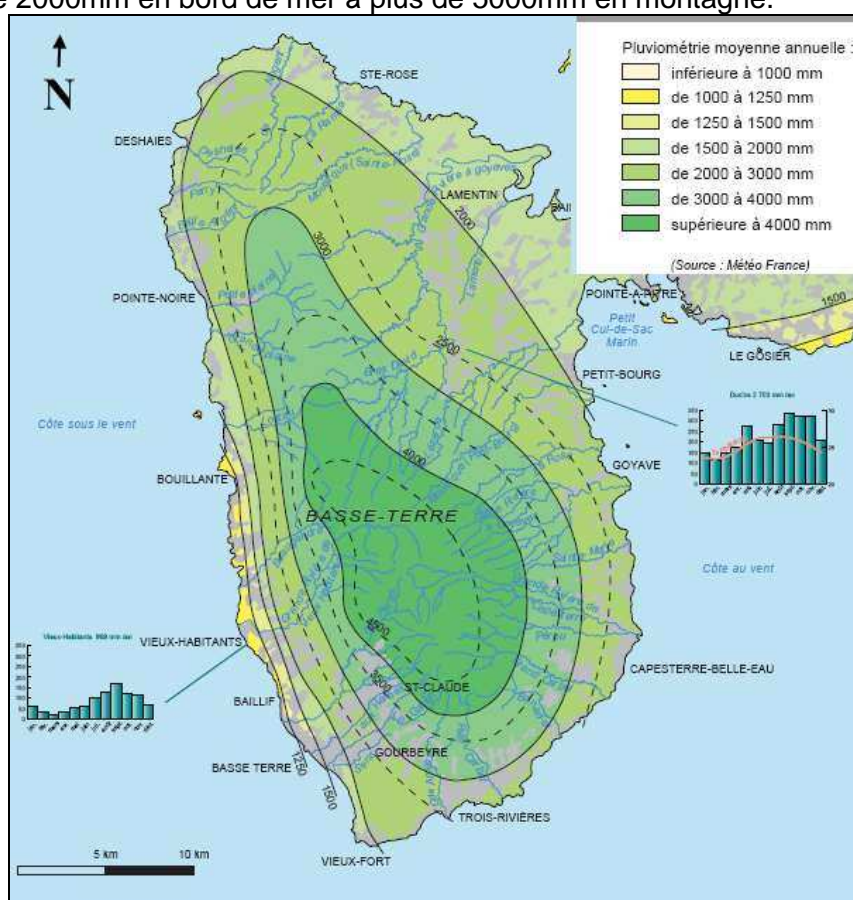


Figure 2 : Pluviométrie, Carte DIREN issue du projet de SDAGE 2002

Contexte géologique

Trois principaux ensembles géologiques se retrouvent sur la commune de Capesterre :

- Dans la partie montagneuse on trouve l'ensemble « Matéliane – Piton de Bouillante » ;
- Vers Trois-Rivières et les hauteurs on retrouve l'ensemble « Massif de la Madeleine » (noté M1 à M7 sur la carte géologique au 1/20000e du massif de la Soufrière).
- Vers Goyave, on retrouve le complexe volcano-sédimentaire anté-miocène

1) *L'ensemble Matéliane – Piton de Bouillante :*

Cet édifice est daté du pléistocène. Il correspond aux puissantes successions de coulées de lave et de pyroclastique allant des pitons de bouillante au Matéliane et à la Montagne de la Capesterre. L'ensemble Matéliane-Bouillante s'est essentiellement mis en place le long des fissures ESE-WNW soulignant une des directions tectoniques les plus importantes de l'île. Les laves sont des andésites sombres à structure microlitique porphyrique.

2) *L'ensemble Massif de la Madeleine :*

Il est constitué de coulées à morphologie bien conservée, situées dans la partie sud est du massif récent, entre les Monts Caraïbes et la Rivière du Grand Carbet. L'activité volcanique qui a donné naissance à cet ensemble s'est traduite par l'épanchement de coulées volumineuses et particulièrement épaisses (jusqu'à 100 m). Ces coulées sont massives, ceinturées de blocs et longues de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres. Les points de sortie de ces coulées sont obturés par l'extrusion de dômes dont le plus important est celui de la Madeleine. Comme en témoignent les épaisseurs et la fragmentation périphérique, la lave de ces coulées et de ces dômes devrait être très visqueuse lors de son émission. L'épanchement de la lave a pu durer plusieurs semaines à plusieurs mois. Les laves sont des andésites basiques très porphyriques, dures et peu vacuolaires.

3) *L'ensemble « volcano-sédimentaire anté-Miocène » :*

Ces formations volcano-sédimentaires sont typiques des dépôts de piémont de la plaine nord-orientale de la Guadeloupe. On y reconnaît un niveau de tuffites à la base, un conglomérat grossier, une couverture supérieure de tufs. Les tuffites sont caractérisées par une alternance de micro-conglomérats et de pélites qui proviennent de l'activité et de l'érosion de la chaîne septentrionale. Les dépôts ont dû s'effectuer en milieu infra-récifal vraisemblablement sous une faible profondeur d'eau. Les niveaux conglomératiques, caractérisés par une forte proportion de galets de natures variées, correspondent à d'anciens chenaux de démantèlement du massif volcanique septentrional. Enfin, les importants dépôts de tufs supérieurs (cendres compactées et altérées) correspondent à l'activité des édifices centraux de la chaîne volcanique. Il est à noter que cet ensemble est profondément altéré et argilisé. Il se présente sous forme de terrain argileux de couleur rouge à ocre, parfois veiné de gris-bleu.

Pédologie

Les sols appartiennent à une climotoposéquence développée sur un matériau andésitodacitique récent, situé au sud de la côte est de la Guadeloupe, dans le district de Capesterre-Belle-Eau. Cette séquence est caractérisée par une transition rapide, au fur et à mesure que l'altitude et la pluviométrie annuelle augmente, des sols bruns rouille à halloysite (haplic nitisols de la classification FAO), à des sols à allophanes appartenant au groupe des andosols (mollic andosols de la classification FAO), et dont le caractère andique est de plus en plus marqué avec l'altitude. On peut ainsi distinguer, en partant du bas de la toposéquence, trois unités caractéristiques : sol brun rouille à halloysite, andosol et andosol perhydraté. (Figure 3)

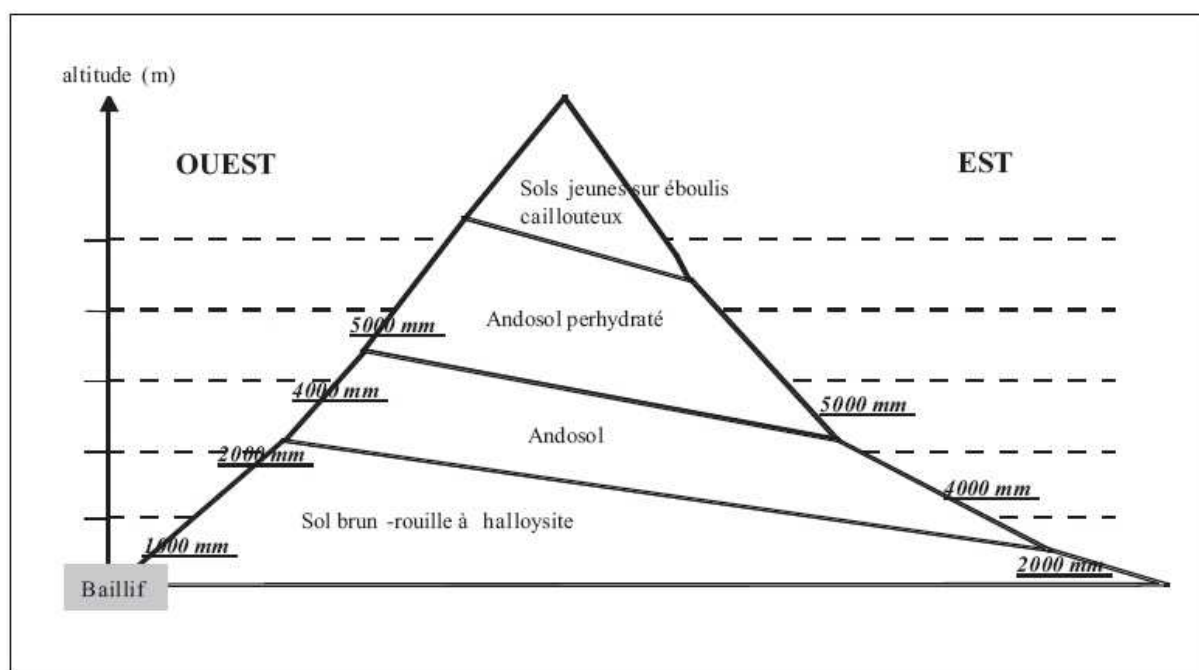


Figure 3 : Distribution des sols et de la pluviométrie dans le sud de la Basse-Terre. D'après Colmet-Daage (1969) et Chaperon et al.

Ces sols se reposent sur des formations volcaniques, parfois très récentes, généralement d'origine éolienne (cendres).

La pluviométrie aidant, et d'autant mieux que les cendres sont plus fines, l'altération des minéraux primaires a été très rapide. Les formations sont souvent entrecroisées et des sols peu évolués peuvent être intercalés avec des sols déjà bien altérés.

1) Les sols à allophanes (andosols) :

Situés dans les régions à pluviométrie importante (zones d'altitude, Figure 3 et 4), ces sols ne sèchent jamais entièrement. On constate alors la formation de substances argileuses particulières, les allophanes, qui ont pour propriété de pouvoir absorber des quantités importantes d'eau. Lorsque ces sols sont transportés hors de leur milieu naturel, l'eau peut être irréversiblement perdue par dessiccation. En milieu naturel, les quantités d'eau fixées peuvent atteindre et même dépasser (200 à 300 %) le poids du sol sec. Ces sols sont de couleur brun-foncé en surface et beige-jaune en profondeur, d'apparence limoneuse avec un toucher souvent onctueux. On les classe selon la quantité d'eau fixée. On distingue les sols dont l'hydratation est inférieure à 100 % en

surface (50 à 150 % en profondeur) et les sols dont l'hydratation est supérieure à 100 % sur tout le profil. Les faciès les plus anciens contiennent de la gibbsite, les plus récents n'en contiennent pas.

2) Les sols argileux à halloysite:

Situés à une altitude inférieure aux précédentes (Figure 3 et 4), ces sols ne sont plus maintenus constamment humides tout au long de l'année et subissent des périodes de dessiccation temporaire (saison sèche). On observe la formation d'une variété d'argile, l'halloysite (du groupe des kaolinites). Cette argile est d'autant plus fréquente que les formations sont éloignées du volcan et plus anciennes. Ces sols de couleur brun-rouille sont de faciès variés :

franchement argileux à argilo-limoneux, ou bien sablo-argileux, plus ou moins évolués. Les faciès de transition vers les ferrisols d'une part, les vertisols d'autre part sont observés. Ils sont de profondeurs modérées.

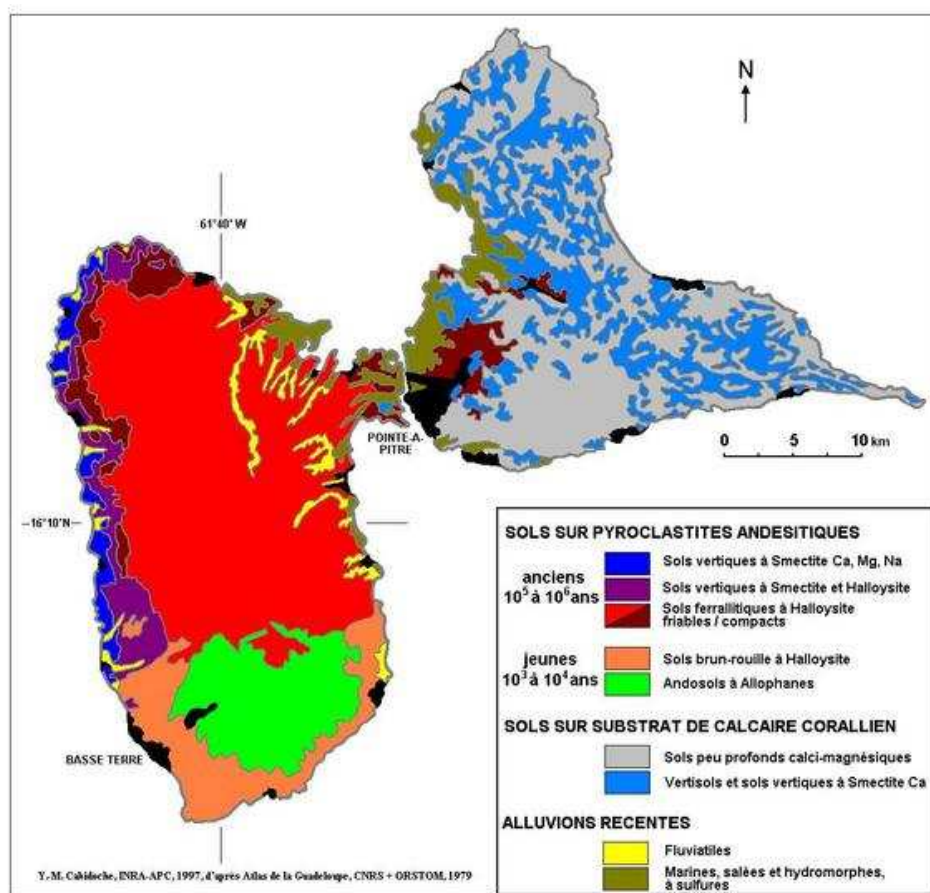


Figure 4 : Carte pédologique, Y.M. CABIDOCHÉ, INRA-APC 1997, d'après Atlas de la Guadeloupe, CNRS+ORSTOM, 1979

Contexte hydrographique

Le réseau hydrographique de l'archipel n'est vraiment représenté et actif qu'en Basse-Terre où une pluviométrie abondante sur des reliefs accentués nourrit un nombre important de cours d'eau pérennes. Les autres îles ne connaissent que des ravines à écoulement intermittent, soit en raison de leur exiguïté pour les petites îles volcaniques, soit en raison de la pluviosité réduite, de la trop grande modération du relief et de la nature perméable des formations sédimentaires pour les grandes îles calcaires (Grande-Terre et Marie-Galante). La majeure partie de la Basse-Terre (950 km² avec une longueur de 46 km pour une largeur de 21 km) est occupée, par une chaîne montagneuse volcanique d'orientation N-S culminant au sommet de la Soufrière. La Basse-Terre compte près de 55 cours d'eau indépendants dont les bassins ont une superficie supérieure à 1 km² : environ 25 en Côte-au-Vent et une trentaine en Côte-sous-le-Vent.

En Côte-au-Vent, entre Vieux-Fort au sud et la Rivière Salée au nord, les rivières s'écoulent vers l'est du canal des Saintes au Petit-Cul-de-Sac Marin. Du sud vers le nord, elles sont issues :

1) du massif de la Madeleine ou de la Soufrière :

la rivière Grande-Anse venant de la Citerne, la rivière du Petit-Carbet qui draine le flanc ouest de la Madeleine, la rivière du Trou-aux-Chiens, la rivière Bananier, exutoire du Grand-Étang, la rivière Saint-Sauveur et la rivière du Grand-Carbet aux trois célèbres chutes qui draine le bassin le plus arrosé de la Guadeloupe,

2) du Matélie, du Grand-Sans-Toucher, du Carmichael et de la montagne de Capesterre :

la Grande Rivière de Capesterre rejointe à moins d'un kilomètre de son embouchure par la rivière du Pérou,

3) ou des mornes plus au nord :

- la rivière Sainte-Marie, la Petite Rivière à Goyaves réunissant la rivière Moreau, les deux bras de la rivière Morin et les deux bras de la rivière du Fort, la rivière La Rose, la rivière Moustique de Petit-Bourg, et la rivière Lézarde issue du morne Moustique,
- les ravines Houaromand, Mahault, Sans-Nom, et du Lamentin qui se perdent dans les zones marécageuses du Petit et du Grand-Cul-de-Sac-Marin assurent la transition entre les rivières de la côte sud-est et de la côte nord-est.
- Plus au nord, les rivières se jettent dans le Grand-Cul-de-Sac marin :
 - la Grande Rivière à Goyaves avec son bassin d'environ 130 km² dont les principaux affluents sont le Bras David (rivières Quiock et Corossol), le Bras de Sable, la rivière Janikeete, les Premier et Deuxième Bras, et les ravines Boucan et Houel ; la rivière Moustique Sainte-Rose, la rivière la Ramée, la rivière la Salée, la rivière Nogent et la rivière du Vieux-Fort.
 - En Côte-sous-le-Vent les rivières s'écoulent vers l'ouest et se jettent dans la mer des Caraïbes.

Sur la commune de Capesterre-Belle-Eau, on dénombre quatre petites rivières et deux de taille plus importante. Les plus petites sont : la rivière de Trou au chien, en limite de commune avec Trois-Rivières, la rivière du bananier, exutoire du Grand-étang, la Rivière Saint-Sauveur et la Rivière de Sainte Marie. Les rivières du Grand Carbet et de la Capesterre, au bassin versant plus important, possèdent un cours supérieur à pente rapide, souvent coupés de cascades importantes, où se rassemblent les ravines qui drainent le versant occidental bien arrosé des massifs de la Soufrière, de la montagne de Capesterre

et du Matéliane ; un cours inférieur en pente douce dans les plaines alluviales de la côte sud-est. La rivière du Grand Carbet est issue de sources situées sur le flanc occidental de la Soufrière. Après une première chute d'une centaine de mètres, elle est grossie sur sa gauche de la ravine Longueteau, puis après une seconde chute, elle reçoit sur sa droite la Ravine Grosse corde (qui draine les flancs de la Citerne et de l'Echelle) et sur sa gauche et sur sa gauche la ravine Dauriac. Les derniers contreforts sont franchis par une troisième chute d'une trentaine de mètres, puis sur environs cinq kilomètres, la rivière coule dans la plaine alluviale.

La Grande rivière de la Capesterre est formée de la réunion des rivières Class et Moudong qui drainent les flancs du Matéliane, du Grand sans toucher, du Carmichael et de la montagne de Capesterre. Après avoir reçu la rivière Madeclaire et la rivière Maillard elle suit une vallée étroite, et a moins de 1 km de son embouchure, est rejointe sur sa droite par la rivière du Perou (voir Figure 5).

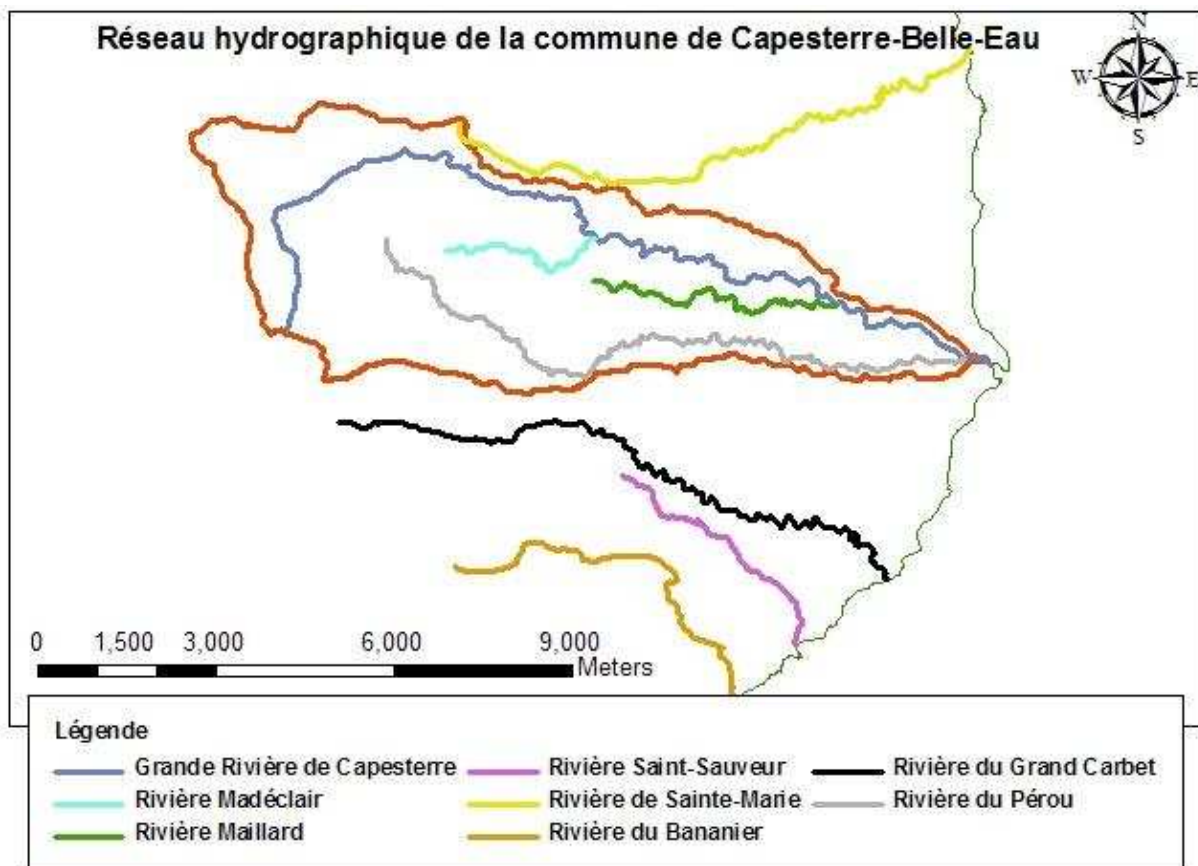


Figure 5 : Réseau hydrographique de la commune de Capesterre

Occupation du sol et mode de cultures

La culture de la canne à sucre puis, beaucoup plus tardivement, celle de la banane ont été le fondement historique et culturel de la Guadeloupe qui conduit à la mise en place d'une économie de plantation rapidement devenue une économie d'exportation. L'agriculture et la filière agro-industrielle fournissent un travail et un revenu à des milliers de familles qui pourraient difficilement être compensés par des emplois dans d'autres activités.

On peut retenir les principales caractéristiques suivantes (Figure 6) :

1) *la canne à sucre* :

- est essentiellement présente sur la Grande-Terre, au nord de la Basse-Terre et à Marie-Galante,
- la superficie exploitée est de 15 500 ha en 1990 (DAF), 13 000 ha en 1994, 12 900 ha en 2000,
- l'objectif d'ici 10 à 15 ans est de 23 000 hectares,

2) *la banane* :

- est quant-à elle essentiellement cultivée sur la côte au vent de Basse-Terre avec quelques développements récents sur une partie de la Grande-Terre,
- la superficie exploitée est de 7 100 ha en 1990 (DAF), 5 800 ha en 1994, 5 000 ha en 2000,
- l'objectif poursuivit est le maintien des surfaces,
- l'évolution possible de la production vers un label de qualité,

3) *diversification : fruits, légumes, horticulture* :

- la superficie exploitée est environ 5 000 ha en 1990 (DAF), 4 800 ha en 1994, 4 600 ha en 2000,
- l'objectif recherché est de 6 000 hectares,
- deux pistes prometteuses semblent être celle du "haut de gamme" et celle de la transformation.

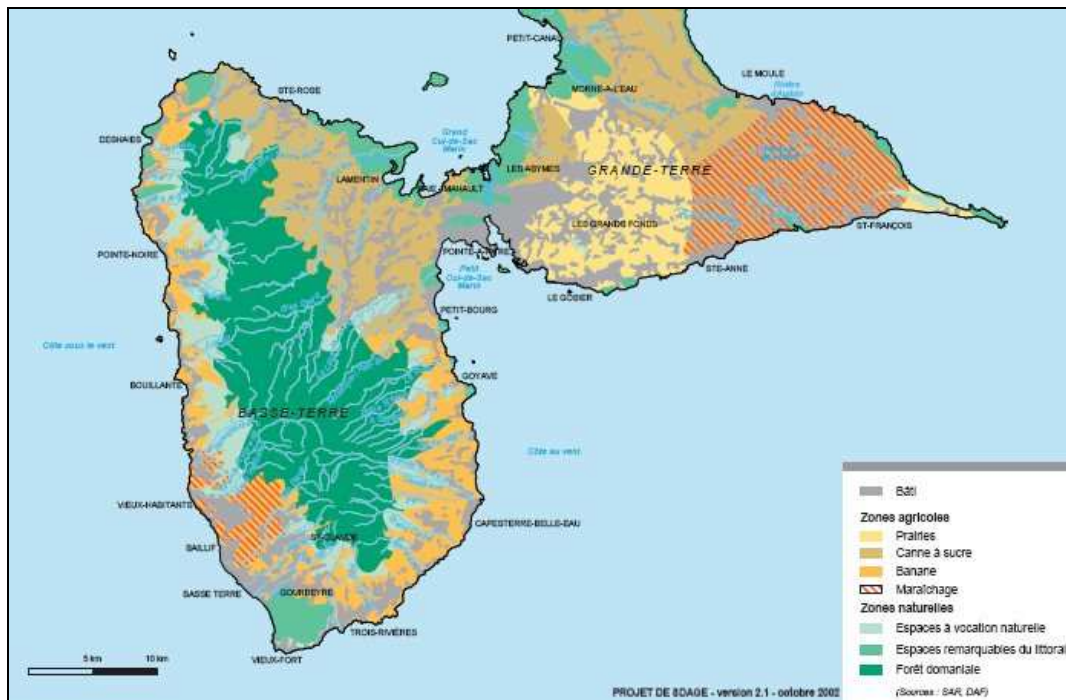


Figure 6 : Occupation du sol, DIREN, projet de SDAGE 2002

La végétation naturelle, forestière lorsque son équilibre naturel a pu être préservé dans les massifs montagneux de la Basse-Terre, très dégradée en savanes, friches, prairies et forêt résiduelle dans les zones les plus accessibles, est essentiellement conditionnée par la pluviométrie, fortement liée à l'altitude. Aux conditions climatiques s'ajoutent les influences pédologiques (faciès sableux, calcaires ou volcaniques). Les espèces cultivées (canne à sucre sur la Grande-Terre et le nord de la Basse-Terre, banane sur le littoral est et sud de la Basse-Terre, cultures vivrières en parcelles ou jardins caraïbes) ont occupé des surfaces croissantes dans les différentes îles.

Sur la commune de Capesterre-Belle-Eau on trouve majoritairement une culture bananière, même si la culture de la canne à sucre y est présente.

La Basse-Terre est caractérisée par la présence massive d'une vaste forêt humide sur la majeure partie du massif. On distinguera une forêt mésophile (pluviométrie annuelle comprise entre 1 800 et 3 000 mm), disposée en auréole autour de la chaîne montagneuse, dont les espèces caractéristiques sont représentées par différentes variétés d'acajous (blanc, rouge et mahoganqy), le bois de rose, le courbaril, etc. Et une forêt hygrophile dans la partie centrale de l'île. Cette forêt pseudo-équatoriale, dense, humide, polystrate, présente un aspect touffu et verdoyant, très hétérogène avec de grands arbres (gommiers, châtaigniers, résolu, palétuvier jaune...), des lianes et épiphytes, des fougères arborescentes et des orchidées. Au-dessus de 1 000 m d'altitude, la végétation, en raison de l'excès de pluviométrie et de la nébulosité, prend un aspect rabougri passant à des tourbières, des mousses et lichens.

Les andosols, gorgés d'eau en permanence et très fertiles conviennent bien à la production bananière. L'irrigation n'est pas nécessaire en raison de la fraîcheur du climat en altitude, ils supportent des cultures maraîchères.

Les mollisols, moins humides, demandent un supplément d'irrigation. Ils sont faciles à travailler et leur perméabilité facilite l'irrigation. Les aptitudes culturales sont variées selon le faciès argileux ou argilo-sableux.

La canne à sucre, en grandes parcelles, est surtout représentée dans la plaine nord-orientale. Les plantations de bananes sont largement présentées dans les petites plaines littorales et les premiers contreforts du sud-est et du sud-ouest de l'île.

Problématique de la pollution par la chlordécone

Les bananeraies des Antilles françaises ont été généralement des monocultures intensives durant la deuxième moitié du XXe siècle. Parmi les intrants apportés en abondance ont figuré des insecticides organochlorés, pour lutter contre le charançon *Cosmopolites sordidus*, dont la larve attaque les bulbes des bananiers : dieldrine et HCH jusque dans les années 60 à 70, chlordécone (C₁₀Cl₁₀O) de 1972 à 1993.

Deux spécialités commerciales à 5% de chlordécone ont été importées aux Antilles, d'usage réservé aux bananeraies :

- Kepone, fabriqué aux USA jusqu'en 1976, mis en marche aux Antilles de 1972 à 1978 (interdit aux USA depuis 1977). L'interdiction a suivi un accident de production industrielle aux USA, qui a montré la dangerosité du produit pour la santé des ouvriers, et pollué durablement les terrains environnants et des sédiments de la «James River».
- Curlone, sous licence de la société Calliope, mis en marche aux Antilles de 1981 à 1993 Les rares données décrivant cette molécule et son comportement, sont suffisantes pour être inquiétantes.

Sa composition chimique laisse présumer :

- Une stabilité thermodynamique élevée, et une résistance à la dégradation chimique ou biologique,
- Une hydrophobie particulièrement élevée, entraînant :
 - une faible solubilité dans l'eau à faible pH (2 mg/l), celle-ci augmentant fortement par formation de chlordécone-hydrate mais seulement au-delà de pH 9
 - une solubilité dans les solvants organiques (benzène, hexane), un coefficient de partage octanol/eau élevé (log K_{ow} = 4,5)
 - une forte sorption sur la matière organique des sols : le coefficient de partage (K_{oc}) entre la fraction équivalente sorbée sur le carbone du sol et la fraction soluble dans l'eau qui est de 17500 L/kg selon Kenaga (1980). Pour autant, des valeurs extrêmement différentes sont relatées : 2000 mentionnée par Bonvallot et Dor (2004), et un log K_{oc} de 3.38 à 3.41 selon Howard et al. (1981), soit un K_{oc} de 2500 L/kg environ.

Comme les autres organochlorés, elle se classe parmi les pesticides non ionisables.

Enfin, la chlordécone présente une faible volatilité (pression de vapeur : $2,5 \times 10^{-5}$ mm Hg). Elle est thermiquement stable jusqu'à son point de sublimation (350°C) et ne subit pas d'oxydation rapide avant d'avoir atteint des températures de 450-500°C. A ces températures, de grandes quantités de dérivé d'hexachlorobenzène sont produites. Il en résulte une incinération de la chlordécone difficile et coûteuse, spécifique pour déchets dangereux, requérant une température supérieure à 1000°C.

La présence de chlordécone dans le sol est principalement liée aux pratiques agronomiques dans les bananeraies entre 1972 et 1993. Ces pratiques comportaient l'usage de 3 kg/Ha de matière active tous les 6 à 18 mois selon les zones et la pression parasitaire. La contamination est durable du fait que l'on n'observe pas de dégradation apparente et que le lessivage est très faible.

La pollution chronique des eaux de surface et des nappes sous andosols est avérée. Les eaux d'irrigation, si les captages en rivière sont à l'aval d'anciennes bananeraies, devraient être surveillées. La qualité des ressources en eau fait l'objet de suivis réguliers par les services de la DIREN, cependant, peu d'informations sont disponibles sur la solubilisation et le transfert de la molécule par les matières solides en suspension. Suite au constat de la contamination des eaux potables, des mesures ont été prises pour garantir la conformité de l'eau distribuée (pose de filtres, procédure de dilution, fermeture de certains captages). Sous réserve du bon suivi technique des installations, la qualité de l'eau de consommation est assurée.

La contamination des eaux et des sédiments peut être rapprochée de la contamination avérée des produits de la pêche. Des concentrations en chlordécone très élevées sont

observées sur les poissons et les crustacés. Elles ont conduit à la publication d'arrêtés préfectoraux interdisant la pêche sur les cours d'eau pollués.

PARTIE 2 : MODELISATION DU BASSIN DE CAPESTERRE-PEROU

Présentation du Modèle SWAT

Développé par Jeff Arnold pour l'USDA Agriculture research service en 1999, SWAT (Soil and Water Assessment Tool) est un modèle distribué permettant de manipuler et d'analyser de nombreuses données hydrologiques et agronomiques. La version 2005 du modèle peut-être couplée à la plate-forme Arcgis 9.2.

Il permet de modéliser les flux d'eau et de solutés à l'échelle du bassin versant. Il a été conçu pour de grands bassins versants allant de quelques centaines de km² à plusieurs milliers de km². Il est largement utilisé aux Etats-Unis et dans certains pays européens. Le couplage avec le SIG permet de gérer des données de type raster, vecteur et alphanumériques. Il facilite et automatise la préparation des données d'entrées, il rend plus convivial la phase d'intégration, de manipulation et le paramétrage des données liées à la simulation. Le paramétrage des données numériques par l'utilisateur et la visualisation des résultats s'effectuent par le biais des formats « Dbase ». Cependant, les fichiers de sorties sont convertis par SWAT en format ASCII possédant leurs propres structures. Plus d'une centaine de fichiers sont requis pour le bon fonctionnement du modèle : modèle numérique de terrain, pédologie, réseau hydrographique, données climatiques de températures et précipitations, occupation du sol, pratiques agricoles, etc.... De nombreuses valeurs sont définies par défaut pour des conditions américaines, mais un grand nombre d'entre elles devront être adaptées au contexte guadeloupéen et tropical. La partie paramétrage du bassin versant est assez longue, au vu du nombre conséquent de données d'entrées nécessaires. La visualisation des résultats se fait sous forme graphique à partir de bases de données.

Collecte des données d'entrée du modèle SWAT

1) Topographie

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) a été obtenu via le CIRAD Roujol et réalisé par le Parc Naturel de Guadeloupe. Il a une résolution spatiale de 10 m.

Sa projection est le WGS 84 UTM 20 Nord et son mode de représentation spatiale le raster.

Ce M.N.T. a été entré dans le modèle, puis son périmètre a été restreint grâce à un masque constitué par la couche contenant les limites du bassin de Capesterre-Pérou.

2) Hydrographie

Le réseau hydrographique de Guadeloupe (Figure 7) a été obtenu par le biais de la BDCarthage Guadeloupe, réalisée par la DIREN Guadeloupe.

La structure de la base de données est identique au format métropole. La BD Carthage Guadeloupe est une version validée par le SIE (Système d'Information sur l'Eau) mais pas par l'IGN et donc des problèmes d'incompatibilité avec des référentiels IGN peuvent survenir.

Son format d'origine, MapInfo Tab + format d'échange MapInfo Mif/Mid, a été converti en format ESRI Shape, son système de projection est le WGS 84 UTM 20 Nord et son type de représentation spatiale le vecteur.

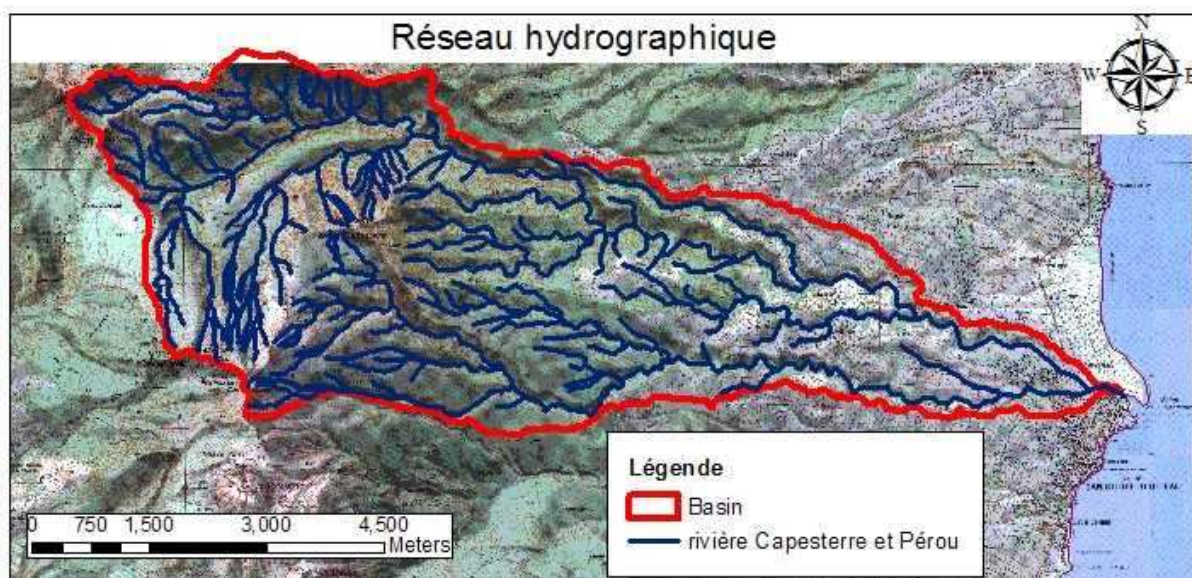


Figure 7 : Réseau hydrographique de Capesterre-Belle-Eau

Notons que cette carte ne permet pas de rendre compte d'une différenciation entre réseau hydrographique pérenne et temporaire.

La couche du réseau hydrographique a été couplée au M.N.T. pour creuser artificiellement le relief et localiser ainsi les zones de flux d'eau et les sous bassins versants (prévision des écoulements de surface).

3) Pédologie

La carte des sols du bassin versant a été réalisée par l'ORSTOM/INRA en 1969 à l'échelle 1 : 20 000. Elle a été fournie sous format numérique par le CIRAD. Son

système de projection est le WGS 84 UTM 20 Nord et son type de représentation le vecteur.

On peut trouver sur le bassin versant de Capesterre-Perou quatre familles de sol : les sols bruns rouille à halloysite, les andosols à allophane, les sols ferrallitiques ou ferralsols et les sols jeunes ou leptosols (Figure 8).

Pour les besoins de la modélisation deux types de sols (« allophane, vo, dess » et « allophane, vo ») ont été regroupés sous la famille des andosols à allophane.

Les paramètres propres aux sols ont quant à eux dû être renseignés manuellement. En effet Swat possède une base de données propre, mais celle-ci est spécifique aux sols des Etats-Unis et ne correspondait pas à ceux de Guadeloupe. Il a donc été nécessaire de collecter préalablement ces données (nombres d'horizons, profondeur, granulométrie, albédo, conductivité hydraulique...) pour les quatre types de sols présents sur le bassin versant de Capesterre-Pérou. Ces informations ont été trouvées dans la littérature (voir la bibliographie des sols) pour une partie puis discutées avec Philippe CATTAN du CIRAD de Guadeloupe pour une autre partie.

Les fiches complètes des sols sont fournies en annexe (voir Annexe 1).

Les paramètres à définir pour chaque horizon de sols sont :

- La profondeur
- La teneur en élément grossier (% poids total),
- La masse volumique,
- La réserve utile,
- La conductivité hydraulique à saturation (mm/h),
- La teneur en carbone organique (% poids du sol),
- La teneur en argile (% poids du sol),
- La teneur en limon (% poids du sol),
- La teneur en sable (% poids du sol),
- L'albédo de la surface en conditions humides.

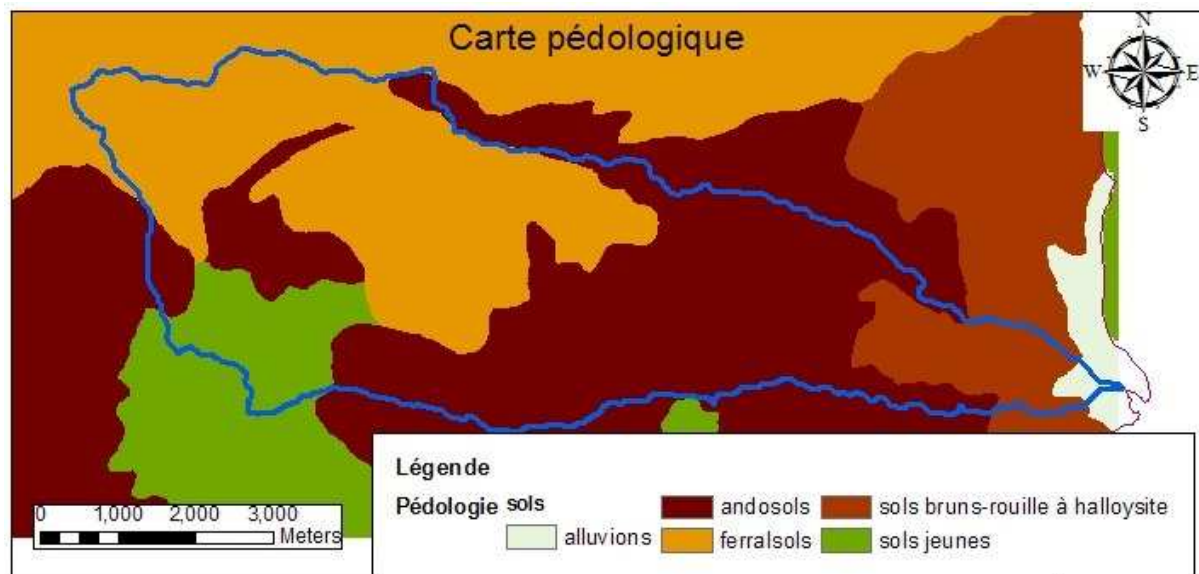


Figure 8 : Carte pédologique

4) Occupation du sol et cultures

L'occupation du sol représente une part importante de ce stage puisque ne possédant aucune carte d'occupation du sol sur le secteur de Capesterre, il a fallu effectuer une cartographie des différentes cultures présentes sur le bassin versant (Figure 9). Celle-ci fut réalisée lors d'un séjour en Guadeloupe et représente une semaine complète de cartographie.

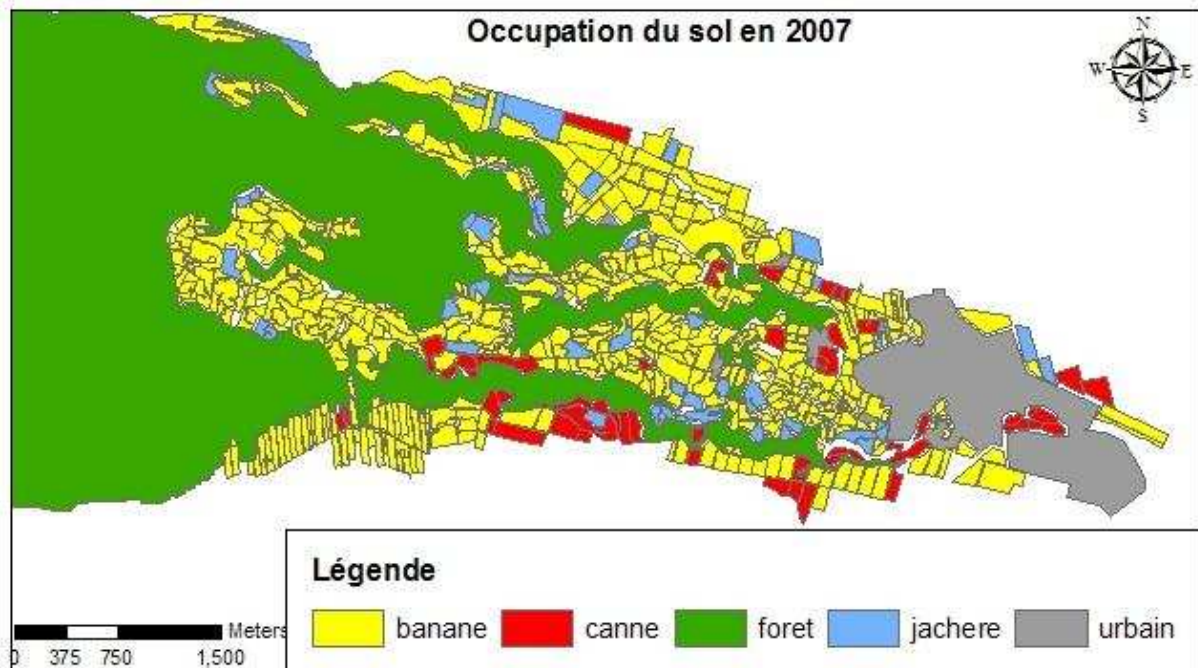


Figure 9 : Carte d'occupation du sol en 2007

Il s'est avéré que la culture largement dominante, comme sur la plupart du sud de la Basse-Terre, est celle de la banane. Seule une trentaine de parcelles, présentes sur la partie aval du bassin versant, comportent de la canne à sucre. Il a fallu ensuite réaliser une recherche bibliographique pour avoir une idée de l'occupation du sol passée de ces vingt-cinq dernières années. À l'issue de cette revue bibliographique, nous avons fait les hypothèses que toutes les parcelles actuelles étaient en culture entre 1980 et 2000, qu'aucune culture n'a été abandonnée depuis et que toutes les parcelles cultivées étaient des plantations de bananes. Les bananes étaient alors cultivées de manière intensive sans rotation des cultures ou mise en jachère (La carte hypothétique est en Figure 10).

Ce mode de pratique agricole est d'ailleurs à l'origine de l'appauvrissement des sols et donc de la diminution des rendements qui sont passés de 45 tonnes par hectare à environ 25 aujourd'hui.

Si on ajoute à cela la concurrence de plus en plus forte des autres pays producteurs et les nouvelles règles établies par l'OMC, cela a conduit les producteurs de banane à changer leur comportement en matière de pratiques agricoles. Ainsi depuis le début des années 2000 la rotation des cultures a été timidement introduite avec la mise en jachère de certaines parcelles et plus rarement la mise en place de la culture de canne à sucre.

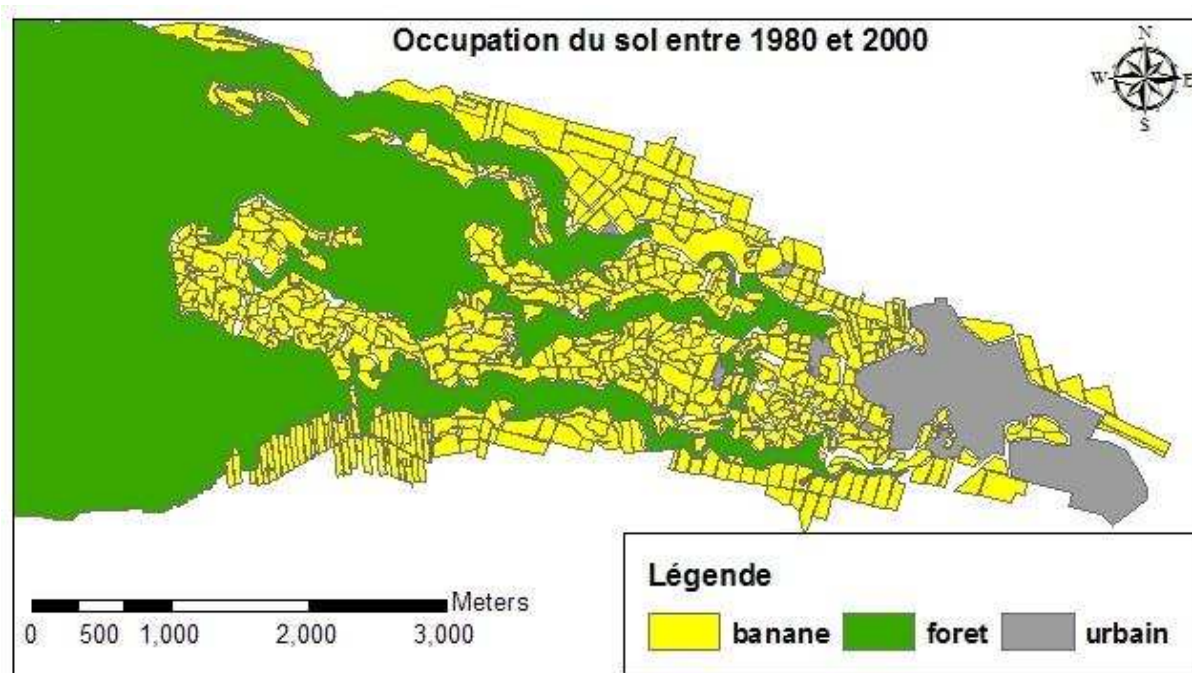


Figure 10 : Carte d'occupation du sol entre 1980 et 2000

Il a fallu ensuite s'intéresser au renseignement de ces cultures dans le modèle SWAT. Les tables de cultures de SWAT possèdent une vingtaine de paramètres exprimant le comportement de la plante et ses caractéristiques physiologiques au cours de l'année culturale (taux de couverture, hauteur, profondeur des racines, rendement escompté). On peut trouver une liste exhaustive de ces paramètres en Annexe (voir Annexe 2).

Swat possède déjà des tables renseignées pour un nombre important de cultures ou autre type d'occupation du sol (ex : forêt, zone urbaine...). Cependant, comme pour les sols, ces tables sont éditées pour le territoire américain et ne prennent donc pas en compte toutes les cultures.

Dans notre cas les paramètres de la canne à sucre, qui étaient intégrés dans SWAT, ont été repris. Ce qui n'était pas le cas pour la banane et la forêt tropicale humide. Les paramètres agronomiques de ces derniers ont été discutés avec les chercheurs du CIRAD de Guadeloupe ou trouvés dans la littérature scientifique (voir bibliographie cultures), et remplis directement dans SWAT.

La table ainsi que la liste des paramètres renseignés de la banane et la forêt tropicale sont fournis en annexe (voir Annexe 2).

La recherche des données sur les cultures ayant été réalisée avant la cartographie des sols, l'ananas a été renseigné dans le logiciel bien qu'il ne soit pas présent sur le bassin. Ceci permettra par la suite de l'utiliser dans les scénarios. On peut donc retrouver ce travail de recherche en annexe avec les tables de la banane et de la forêt tropicale.

5) Données climatiques

Le logiciel SWAT permet l'intégration de plusieurs stations météorologiques à la modélisation.

Dans un premier temps il convient de renseigner dans la base de données la localisation de ces stations, leur altitude ainsi que la moyenne mensuelle de chaque paramètre climatique (voir la description complète ci-dessous).

Dans un second temps les données journalières de ces différents paramètres pourront être indiquées lors de la modélisation. Dans le cas où certains paramètres viendraient à faire défaut, ou qu'une période de lacune dans les données apparaisse, SWAT permet d'effectuer une simulation de ceux-ci à partir des données mensuelles de références de la station.

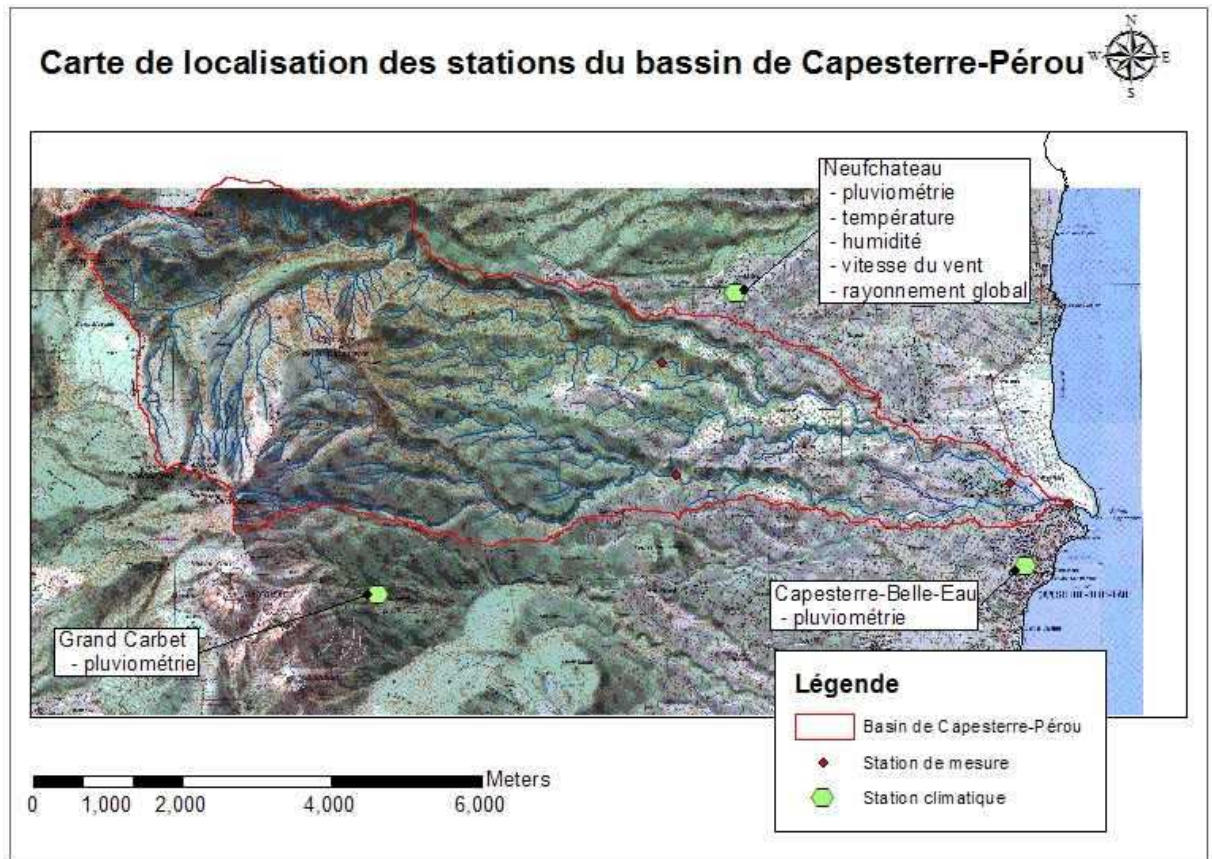



Figure 11 : Carte de localisation des stations climatiques

Trois stations météorologiques étaient disponibles pour les simulations (Figure 11): celle de Neufchateau (253m d'altitude), celle du Grand Carbet (670m) d'altitude et enfin celle de Capesterre-Belle-Eau située à 19m d'altitude. Malheureusement ces stations ne possédaient pas toutes de données climatiques complètes et pas pour la même période. Les données disponibles sont résumées dans le tableau ci-dessous (Tableau 1).

Tableau 1 : Disponibilité des données climatiques

Station climatique	Paramètres	Date							
		1983 à 1989	90	91	92	93	94	95	1996 à 2007
Neufchateau	T, Rg, Vt, Hr								
	Pluviométrie								
Grand Carbet	Pluviométrie								
Capesterre	Pluviométrie								

T : Température, Rg : Rayonnement global, Vt : Vitesse du vent, Hr : Humidité relative

 : Données disponibles

Les données climatiques pour la station météorologique de Neufchateau ont été fournies par le réseau agro-météorologique de Guadeloupe « Rainette » piloté par le CIRAD. Le dispositif Rainette est constitué d'un réseau de stations agro-météorologiques automatiques en Guadeloupe alimentant une base de données accessible aux professionnels de l'agriculture guadeloupéenne. J'ai pu obtenir les données journalières complètes (pluviométrie, températures maximum et minimum, rayonnement global, vitesse du vent et humidité relative) sur la période de 1994 à 2007 pour cette station situé à 253 m d'altitude.

Il a fallu dans un premier temps éditer la station de Neufchateau dans la base de données du modèle (nom et coordonnées géographiques) et renseigner pour chaque mois les paramètres ci-dessous moyenné sur la période disponible (de 1994 à 2007):

- Les températures (°C) maximales et minimales moyennes ainsi que les écarts type correspondants calculés pour l'ensemble des données météo disponibles
- Le total de la pluviométrie (mm) moyenne et l'écart type
- L'intensité maximale des pluies (mm) sur une période de 30 minutes (estimation grâce aux données d'intensité maximale sur une période d'une heure qui étaient disponibles. Les valeurs d'intensité maximale sur une heure ont été multipliées par deux afin d'obtenir une estimation de l'intensité maximale sur 30 minutes)
- Le nombre de jours de pluie moyen
- Le rayonnement solaire global moyen (MJ/m²/jour)
- La vitesse moyenne du vent (m/s)
- Le coefficient skew qui traduit la régularité de la répartition des pluies dans un mois (calculé à partir de la fonction du coefficient d'asymétrie intégrée à Excel : « COEFFICIENT.ASYMETRIE ». Cette fonction renvoie l'asymétrie d'une distribution. Elle caractérise le degré d'asymétrie d'une distribution par rapport à sa moyenne. Une asymétrie positive indique une distribution unilatérale décalée vers les valeurs les plus positives. Une asymétrie négative indique une distribution unilatérale décalée vers les valeurs les plus négatives.)
- La probabilité qu'un jour sec laisse place à un jour humide
- La probabilité qu'un jour humide suive un autre jour humide
- Le point de rosée moyen.

Les données journalières de ces paramètres ont ensuite été éditées sous le format dbase afin de les intégrer au modèle.

Les données de pluviométries journalières, ont été fournies par l'unité de service Agroclim de l'INRA d'Avignon pour la période de 1983 à 1989.

Une synthèse des moyennes et écarts type annuels des principaux paramètres climatiques de cette station sont résumé dans le Tableau 2, ci-joint :

Tableau 2 : Moyenne et écart-type des paramètres climatiques de la station de Neufchateau (1997-2007)

	P (mm)	T max (°C)		T min (°C)		Rg (MJ/m²/jour)		Vt (m/s)		Hum (%)	
année	somme	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type	moyenne	écart-type
1997	2474.60	27.51	1.32	22.26	1.57	15.42	4.27	1.17	0.24		
1998	5211.70	28.52	1.66	23.05	1.63	15.07	4.68	1.28	0.38		
1999	3235.20	27.41	1.41	22.05	1.43	16.26	4.66	1.29	0.36		
2000	2860.80	26.90	1.36	21.82	1.46	15.41	4.34	1.44	0.33		
2001	2813.70	26.92	1.46	21.84	1.52	16.19	4.74	1.31	0.32		
2002	3317.60	26.73	1.56	21.83	1.64	14.89	4.13	1.36	0.31		
2003	3565.80	27.38	1.23	22.15	1.22	14.91	4.33	1.46	2.82		
2004	6568.20	27.07	1.38	21.97	1.23	13.92	4.50	1.28	0.43		
2005	2758.60	27.79	1.57	22.46	1.49	15.68	5.11	1.08	0.46	87.13	3.73
2006	2603.40	27.38	1.59	22.17	1.31	16.48	4.80	0.97	0.43	88.13	4.01
2007	1624.60	27.21	1.55	22.27	1.21	16.51	4.77	1.20	0.56	87.83	3.68

Météo France Antilles-Guyane a fourni les relevés pluviométriques journaliers de 1983 à 1995 de deux autres stations proches du bassin versant de Capesterre-Pérou. Ceux de la station du «Grand-Carbet » situé à 670 m d'altitude et ceux de la station de « Capesterre-Belle-Eau » situé à 19 m d'altitude. Ne possédant que les données de précipitation ces stations (voir Tableau 3) n'ont pu être renseignées intégralement. Il a donc fallu utiliser les données de température maximale et minimale, rayonnement global, vitesse du vent et humidité relative de la station de Neufchateau pour compléter ces deux stations.

Les données journalières de précipitation ont ensuite été éditées sous le format dbase.

Tableau 3 : Précipitation annuelle des stations climatique du Grand Carbet et Capesterre-Belle-Eau (1983-1995)

	Capesterre-Belle-Eau (19 m)	Grand Carbet (670 m)
	Pluviométrie (mm)	
1983	1587.0	5026.5
1984	2227.4	5647.0
1985	2116.5	5845.0
1986	2134.9	5349.3
1987	2755.6	6237.0
1988		6039.0
1989	1883.8	5910.0
1990		5206.0
1991	1447.7	4825.0
1992	3265.0	
1993	2195.9	
1994	1682.4	
1995		4281.6

Mise en œuvre du modèle SWAT

1) *Discrétisation spatiale*

La discrétisation spatiale est la première étape à effectuer pour faire tourner le modèle. Elle consiste à extraire à partir du MNT les limites du bassin versant de Capesterre-Pérou ainsi que son réseau hydrographique. Dans SWAT, la procédure de délimitation est automatisée.

La première chose à faire est d'indiquer l'emplacement du MNT que l'on veut utiliser pour la délimitation. Le calcul des limites est alors réalisé en cinq étapes:

- Incrustation du vrai réseau hydrographique
- Comblement des points bas et calcul des pentes
- Détermination des directions d'écoulement
- Calcul des surfaces drainées
- Extraction automatique du réseau hydrographique
- Détermination des limites du bassin versant

Le traitement du MNT a abouti en premier lieu à la création de 24 sous bassins. A chaque intersection de portion de cours d'eau le modèle a placé un exutoire potentiel (outlet), et par conséquent créé un sous bassin. La quasi totalité de ces sous bassins était d'une très petite taille. Développé pour gérer des bassins versant de plusieurs centaines de kilomètres carré, SWAT gérait mal la mise en œuvre de la spatialisation des données pédologiques et d'occupation du sol. En effet la simulation a été testée avec ses 24 sous bassins mais le modèle n'arrivait pas à mener à termes l'étape de distribution des HRU et affichait un message d'erreur (voir chapitre 3).

Le nombre de sous-bassins a donc été réduit en ne gardant que quatre exutoires, aux endroits où l'on disposait de données d'observation (mesures de débit ou de qualités de l'eau). Ainsi quatre sous-bassins ont été créés (Figure 12)

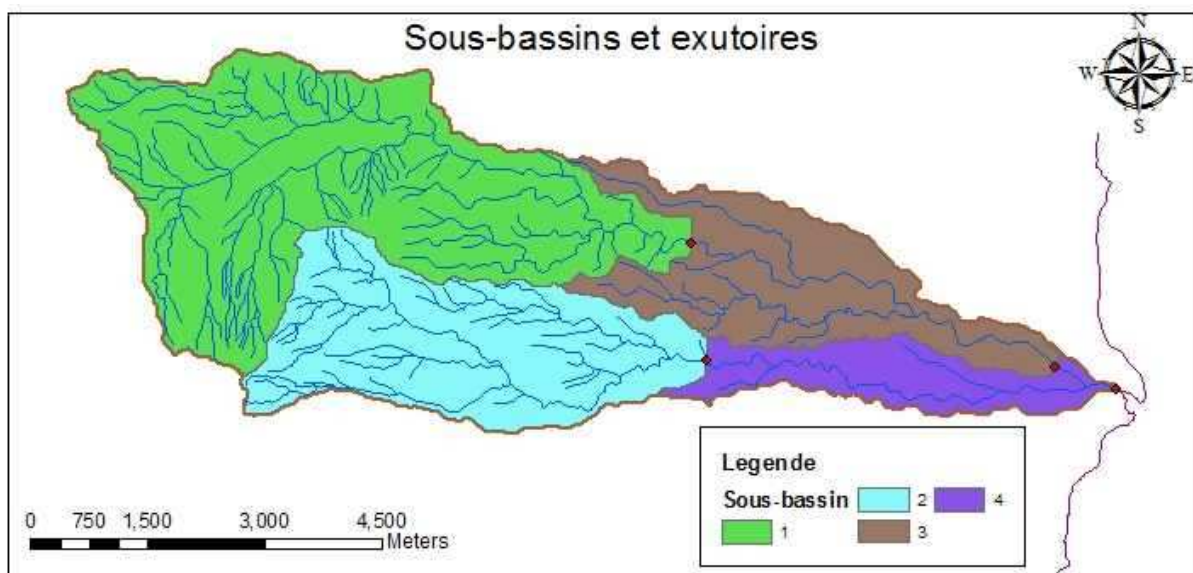


Figure 12 : Sous-bassins et exutoires du modèle

2) *Intégration des données sol et occupation du sol*

Une fois le réseau hydrographique déterminé et les limites du bassin versant extraites, SWAT propose d'intégrer les données pédologiques, d'occupation du sol et de classe de pente.

Pour ce qui est des données pédologiques il a suffi d'indiquer l'emplacement de la couche « carte de sol » préalablement digitalisée (Figure 8) en prenant soin de toujours la présenter dans le même système de coordonnées. Puis le logiciel s'est chargé de découper la couche de sol par les limites du bassin précédemment établies (Clipping). Il a fallu ensuite établir la correspondance entre les types de sols de la carte et la table sol de SWAT préalablement renseignée (voir Annexe 1) où sont enregistrées les valeurs des paramètres utilisés par le modèle (nombre d'horizons, profondeur, capacité en eau, granulométrie ...).

L'occupation des sols fonctionne de la même manière que la carte des sols. L'emplacement de la couche d'occupation du sol digitalisée (Figure 9) a été indiqué en établissant la correspondance entre les types de culture et la table des cultures de SWAT (voir Annexe 2).

L'occupation des sols n'étant pas un état figé du parcellaire, les différents types d'évolution des parcelles (rotations propres à chaque exploitant) vont avoir une incidence sur le comportement hydrologique de la parcelle.

Afin de prendre en compte et de spatialiser l'évolution de chaque parcelle selon le type de rotations effectuées par les exploitants, il est possible d'établir des tables renseignant sur la rotation culturale.

Cependant dans le cas de cette modélisation la rotation culturale n'a pas été exploitée pour plusieurs raisons.

Comme expliqué dans le chapitre traitant de l'édition des données d'occupation du sol, la rotation culturale n'est apparue que dans le courant des années 2000 sur le bassin versant de Capesterre-Pérou. Avant cette date seule la culture bananière intensive existait. Ainsi la rotation des cultures n'est effective sur le bassin de Capesterre-Pérou que sur les six dernières années des vingt-quatre de modélisation. Il est important de noter que la rotation culturale qui a lieu depuis cette date n'est pas encore entrée dans les habitudes de la majorité des planteurs de banane. Elle représente un mode d'exploitation des parcelles encore minoritaire.

De plus la cartographie de ce bassin versant s'est effectuée en un temps très limité (une semaine). Il a donc fallu se limiter à une cartographie d'observation en se rendant sur chaque parcelle. La majorité des producteurs étant de petits planteurs indépendants, il a été impossible de se renseigner auprès de chaque exploitant agricole s'il pratiquait ou non la rotation des cultures.

La dernière raison est néanmoins la plus importante en ce qui concerne la justification de l'absence de rotation culturale pour cette modélisation. En effet, comme il est expliqué dans le chapitre suivant (distribution des HRU), SWAT ne prend pas en compte les types d'occupations du sol qui représente une surface inférieure à 20% de la surface des sous-bassins. Ceci a une conséquence directe sur cette modélisation puisque les parcelles de canne à sucre et de jachère représentent une surface inférieure à 20% dans chacun des quatre sous-bassins. Ainsi ces deux types d'occupation du sol ne sont pas pris en compte par le modèle lors de la simulation. C'est pourquoi la rotation culturale s'avère inutile à mettre en place dans ce cas présent.

Le logiciel SWAT permet de découper le bassin versant en classe de pentes (quatre au maximum). Ceci s'avère très utile pour les bassins ayant de fort dénivelé comme c'est le cas pour notre étude et plus généralement sur toute la Basse Terre de

Guadeloupe. Il a donc été choisi de découper le bassin versant en trois classes de pente. La première ayant pour valeurs seuil 0 à 25%, la seconde 25 à 85% et la dernière 85 à 100%. Puis SWAT a découpé automatiquement le bassin en créant une nouvelle couche propre aux classes de pente.

3) Distribution des HRU

Afin de prendre en compte les hétérogénéités du milieu, et mieux modéliser les différents processus, SWAT va spatialiser les types de réponse, c'est-à-dire que le modèle va calculer la valeur quantitative des différents processus sur chaque unité spatiale.

L'unité de base du calcul est la HRU (Hydrological Response Unit). Cette discrétisation spatiale en sous unités correspond à la combinaison, pour un sous-bassin versant, d'un type de sol, d'une classe de pente et d'un type d'occupation du sol (Figure 13) dont les paramètres vont influencer sur les processus hydrologiques (ruissellement, infiltration, évapotranspiration...).

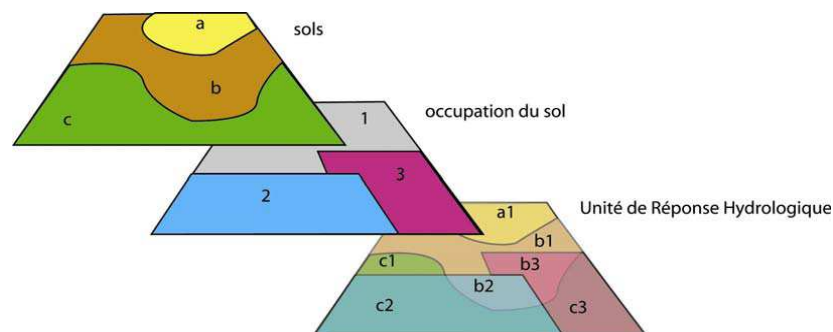


Figure 13 : Principe de délimitation des HRU (Renaud, 2004, d'après Duros 2002)

Une HRU aura donc un comportement hydrologique propre et homogène. Les différents flux (eaux, pesticides) sont donc calculés sur la base de cette unité puis sommés pour fournir une valeur globale à l'exutoire du bassin.

La commande de distribution des HRU de SWAT permet à l'utilisateur de spécifier certains critères qui vont influencer sur le mode de distribution.

Au choix, une ou plusieurs combinaisons de sol/culture/pentes peuvent être créées sur le bassin. En effet l'utilisateur peut assigner une seule HRU à chaque sous bassin ; celle-ci étant alors créée en prenant en compte seulement le triplet (culture, classe de pente, sol) dominant.

La seconde possibilité est d'assigner plusieurs HRU par sous-bassin. C'est cette méthode qui a été choisie car plus représentative. Il s'agit alors de déterminer un seuil critique représentant un pourcentage de superficie du sous-bassin. Cette valeur va alors déterminer quels types de sols, classes de pente et cultures ne seront pas pris en compte lors de la simulation. En effet si par exemple une culture couvre une surface inférieure au seuil fixé, elle ne sera pas prise en compte. Il en est de même pour les types de sols et classes de pente.

Le seuil établi était de 20%. Cette valeur peut sembler importante mais après de multiples essais c'est le seuil minimal que le logiciel acceptait pour cette modélisation. Ceci a des conséquences directes sur la simulation puisque dans le cas présent la culture de la canne à sucre ainsi que la mise en jachère des parcelles n'ont pas été prises en compte du fait de leur faible surface de couverture.

Il peut être intéressant de noter que, comme évoqué dans le chapitre sur la Discrétisation spatiale, la simulation a été testée avec un plus grand nombre de sous-bassin. Lors de cette simulation la possibilité d'assigner plusieurs HRU par sous-bassin s'est avérée impossible est affichait un message d'erreur avant d'être terminée.

La première méthode de distribution des HRU qui assigne une seule HRU par sous-bassin a donc été testée sur ces 24 sous-bassins. Il s'est avéré que ce mode de distribution ignorait de la même manière les parcelles de canne à sucre et mises en jachères. Ceci étant toujours dû au fait que ces types d'occupation du sol représentait une surface trop faible sur les sous-bassins.

Ceci confirme le choix de limiter la découpe du bassin versant à seulement 4 sous-bassins ayant une taille plus appropriée au modèle SWAT.

La distribution des HRU a abouti à la création de 15 unités combinant sols, cultures et classes de pente et réparties sur les 4 sous-bassins. Le premier des sous-bassins regroupant deux HRU, le second et le troisième quatre HRU chacun et le dernier cinq HRU. Notons que dans cette version de SWAT la visualisation cartographique des HRU créé n'est pas possible. Seul un rapport d'analyse sous le format texte permet de vérifier les HRU ainsi créés. En voici le résumé (Tableau 4).

Tableau 4 : Distribution des HRU

	sous-bassin 1		sous-bassin 2				sous-bassin 3				sous-bassin 4				
	HRU 1	HRU 2	HRU 3	HRU 4	HRU 5	HRU 6	HRU 7	HRU 8	HRU 9	HRU 10	HRU 11	HRU 12	HRU 13	HRU 14	HRU 15
occupation	Foret	Foret	Foret	Foret	Foret	Foret	Banane	Banane	Foret	Foret	Banane	Banane	Banane	Foret	Foret
sol	Fer.	Fer.	Ando.	Ando.	Fer.	Fer.	Ando.	Ando.	Ando.	Ando.	Ando.	Brun	Brun	Ando.	Ando.
pente (%)	25-85	85-100	25-85	0-25	25-85	85-100	25-85	85-100	25-85	85-100	0-25	0-25	25-85	0-25	25-85
surface	29.40%	16.40%	11%	8.70%	4.10%	2.30%	7.40%	2.10%	2.60%	6.80%	2.80%	2.30%	0.90%	0.90%	2.15%

Fer.= Ferralsol, Ando.= Andosol, Brun= Sol brun rouille à halloysite

4) Intégration des données climatiques

Une fois que les HRU ont été distribuées, on peut importer les données climatiques qui seront utilisées pour la simulation sur le bassin. Le logiciel permet à l'utilisateur de charger la localisation des stations météo renseignées de manière mensuelle précédemment.

Dans un second temps, les données journalières des différents paramètres climatiques, éditées au format dbase, ont été intégrées. Ces données journalières ne sont pas indispensables pour mener à bien la simulation, cependant on peut aisément comprendre qu'elles s'avèreront très utiles pour un meilleur résultat de la simulation.

Comme expliqué dans le chapitre traitant de la collecte des données, la station de Neufchateau (253m d'altitude) possédait l'intégralité des données journalières pour la période de 1994 à 2007. Quant aux deux autres stations, Capesterre (19m) et Grand Carbet (670 m), seules les données de pluviométrie journalières sur la période de 1983 à 1995 étaient disponibles

Les données manquantes ou les périodes de lacune ont été simulés par SWAT à partir des données mensuelles de références de la station.

Ce simulateur de climat est basé sur un modèle Markov. Pour la simulation des précipitations journalières le modèle Markov calcul dans un premier temps la distribution de jours humides et secs. Lorsqu'un jour est défini comme humide le modèle génère la quantité de précipitation tombée grâce à l'équation suivante :

$$R_{day} = \mu_{mon} + 2 \cdot \sigma_{mon} \cdot \left(\frac{\left[\left(\frac{SND_{day} - g_{mon}}{6} \right) \cdot \left(\frac{g_{mon}}{6} \right) + 1 \right]^3 - 1}{g_{mon}} \right)$$

Où R_{day} est le taux de précipitation pour un jour donné (mm), μ_{mon} est la moyenne mensuelle des précipitations journalières (mm), σ_{mon} est l'écart type des précipitations journalières pour le mois, SND_{day} est le « standard normal dévié » journalier, et g_{mon} le coefficient Skew pour les précipitations journalières du mois.

Le SND_{day} est calculé par la formule : $SND_{day} = \cos(6.283 \cdot rnd_2) \cdot \sqrt{-2 \ln(rnd_1)}$, où rnd_1 et rnd_2 sont des nombres aléatoire compris entre 0 et 1.

5) Intégration des données complémentaires (pratiques agricoles)

Une fois les données climatiques rentrées, le modèle va procéder à la construction des différentes tables contenant les informations nécessaires à la création des données d'entrée utilisées par SWAT.

Parmi les tables créées lors de cette opération, la table concernant les pratiques agricoles va pouvoir être modifiée.

Les pratiques agricoles de la banane, culture largement dominante, représentent un intérêt beaucoup plus important que celles de la canne à sucre pour la modélisation présenté dans ce rapport. Ceci étant du à sa très forte représentabilité sur le bassin versant de Capesterre-Pérou, mais surtout car c'est sur cette culture qu'à été utilisé à forte dose la chlordécone.

Ce pesticide utilisé aux Antilles de 1972 à 1993 pose aujourd'hui de grave problème de santé publique.

Le problème de la contamination par la chlordécone fait face à un quasi-désert bibliographique. Du fait de la polémique en cours dans les Antilles françaises rares sont les acteurs de l'époque qui acceptent d'aborder ce sujet, laissant libre cours aux inquiétudes souvent justifiées de la population antillaise. Même les organismes publics tels que la DIREN hésite à fournir les données d'analyse d'eau.

Des études récentes sur le sujet existent et ont pu être consultées. Notamment le rapport final « Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles : relation avec les systèmes de culture » mené par le CIRAD et L'INRA entre 2003 et 2005 et coordonné par Yves-Marie Cabidoche.

Toutes les données concernant la chlordécone sont issues de ce rapport. Ainsi il a fallu, dans un premier temps, entrer les données relatives à la chlordécone dans la base de données de SWAT. En effet le logiciel possède des renseignements pour une liste importante de pesticides et fertilisants mais pas sur la chlordécone.

Les paramètres qui ont été renseignés sur ce pesticide sont les suivants :

- le coefficient de partage (Koc) entre la fraction équivalente sorbée sur le carbone du sol et la fraction soluble dans l'eau qui est de 17500 L/kg. (Le rapport mené par l'INRA et le CIRAD fait état de plusieurs valeurs très différentes comme mentionné précédemment (17500, 2500 et 2000 L/kg). Cependant la valeur retenue dans ce rapport était de 17500 L/kg. Dans un premier temps c'est donc cette valeur qui a été renseignée)
- le taux de solubilité dans l'eau qui est de 2 mg/L

- le temps de demi-vie de la chlordécone dans le sol. D'après une étude tirée du rapport cité précédemment « rien n'indique que la chlordécone se dégrade dans les sols des Antilles » et « il est inutile d'introduire une hypothèse de dégradabilité de la molécule pour rendre compte de l'état de contamination actuel ». Ainsi la contamination quantifiable des sols durera entre 1 et 6 siècles. En partant de ces données, le temps de demi-vie de la chlordécone dans le sol a été fixé à 10 000 jours (un peu plus de 200 ans) soit la période maximale que SWAT puisse accepter.

Dans un second temps il a fallu intégrer l'utilisation de ce pesticide dans la table concernant les pratiques agricoles. Le taux d'utilisation estimé de ce produit de 3kg/ha/an est décrit dans le rapport précédemment cité. Du fait de l'efficacité du chlordécone et surtout de son coût très élevés, il semblerait que cette dose d'application n'est pas été dépassée. Son utilisation a cessé en 1993 suite à son interdiction dans les Antilles françaises.

Ensuite, les taux et périodes d'applications de fertilisants (qui existait déjà dans la base de données de SWAT) ont été renseignés dans cette même table.

Le rapport précédemment cité sur la chlordécone a aussi permis d'apporter des précisions sur le travail du sol effectué en bananeraie avant les années 2000. Il s'est avéré que dans la grande majorité des cas, le labour était totalement inexistant du fait du caractère pérenne de la culture bananière.

Simulation

Les données étant intégrées au modèle et celui ci est donc prêt pour la simulation. Plusieurs options s'offrent alors à l'utilisateur.

La première étape consiste à définir la période de temps sur laquelle la simulation va être effectuée.

Possédant des mesures de débits journaliers dans la rivière de Capesterre de 1983 à 1991 et 2000 à 2007, au niveau de l'exutoire du premier sous-bassin (Figure 14), cette station a été retenue pour la simulation du modèle. Cependant il existe des lacunes dans ces mesures de débits notamment de 1992 à 2000.

Ensuite l'utilisateur peut choisir le pas de temps de sortie des données (journalier, hebdomadaire ou mensuel). Il a été choisi dans un premier temps un pas mensuel. Puis considérant que les mesures de débit sur le bassin étaient quotidiennes, il a également été choisi des simulations au pas de temps journalier.

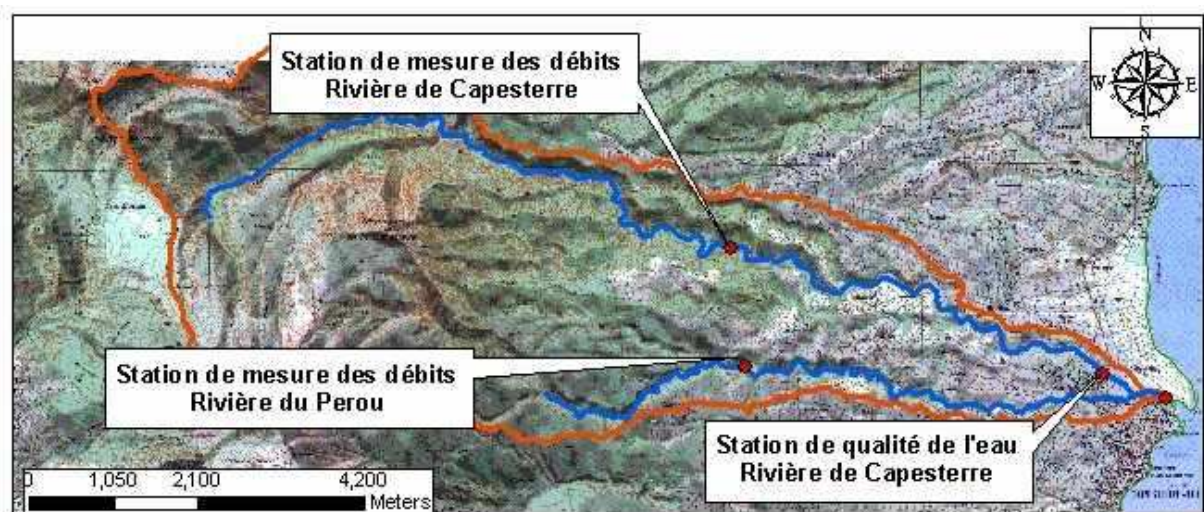


Figure 14 : Carte de localisation des stations de mesure

Des fichiers de sorties sont générés à chaque nouvelle simulation de SWAT. Le fichier résumant les processus sur le bassin (output.std) permet de voir à chaque pas de temps les valeurs de précipitation, du ruissellement, de l'infiltration, de l'évaporation et l'évapotranspiration, de la recharge de l'aquifère, du taux d'application des engrais et pesticides, ainsi que du taux de nitrate dans les sols.

Un autre fichier (output.sbs) présente les mêmes paramètres que précédemment mais en les détaillant au niveau des HRU. Un troisième détaille (output.bsb) les valeurs des processus à l'échelle du sous bassin versant. Enfin, le dernier (output.rch) montre les valeurs des paramètres concernant l'eau dans le cours d'eau (débit à l'exutoire, taux du pesticide le plus important dans la rivière, taux de nitrates dans la rivière).

Ces fichiers sortent sous la forme de fichiers texte délimités et sous forme de base de données « Access », il est possible de les représenter sous forme graphique en important le fichier sous Excel.

Calibration du modèle

Pour permettre une meilleure concordance entre les variables simulées et observées, il est nécessaire d'adapter certains paramètres du modèle. Cette phase s'appelle la calibration. Elle a porté sur les paramètres de sol qui ont une incidence essentielle sur les simulations. La première variable de contrôle de la calibration concerne le débit de la station de mesure, au pas de temps mensuel, puis dans un second temps au pas de temps quotidien.

L'étape de calibration nécessite donc de posséder des données de débits observés. Dans le cas présent deux chroniques de débits sont disponibles.

La première et la plus importantes concerne les débits de la Grande rivière de Capesterre. Située au niveau de la station de mesure de la rivière (latitude : 16°04'28", longitude : -61°36'19", altitude : 206 m), c'est-à-dire à l'exutoire du premier sous-bassin (Figure 14), cette chronique de débits quotidiens couvre la période de 1983 à 1991 et de 2000 à 2007 (Tableau 5).

La seconde chronique de débit est située à l'exutoire du deuxième sous-bassin (latitude : 16°03'36", longitude : -61°36'12", altitude : 205 m), sur la rivière du Pérou. Elle couvre la période de 1987 à 1991 mais possède d'importantes et nombreuses lacunes de valeurs. Cette station n'a pas été retenue pour la calibration du modèle mais a servi plus tard à la validation spatiale de la simulation.

Tableau 5 : Disponibilité des mesures de débit et qualité de l'eau

		Date																			
station	paramètre	1983	84	85	86	87	88	89	90	91	1992 à 1998	99	2000	1	2	3	4	5	6	2007	
La digue riv. Capesterre	débits																				
riv. Perou	débits																				
Pont RN riv. Capesterre	nitrates																				
	chlordécone																				



: Données ponctuelles



: chronique de débits journaliers

1) Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité d'un modèle permet de savoir quels sont les paramètres sur lesquels les ajustements doivent être très précis et quels sont ceux sur lesquels au contraire il n'est pas utile de passer beaucoup de temps.

Trois analyses sont possibles dans SWAT, on peut tester la sensibilité des variables : débits, sédiments et qualités des eaux de surface. Nous avons choisi de travailler sur la sensibilité des débits.

L'analyse s'applique à un sous-bassin pour une simulation donnée est crée un fichier de sortie où un rang est assigné à chaque paramètres testés. Ainsi le paramètre dont le rang est le plus proche de 1 sera le plus sensible pour la calibration des débits. En voici les résultats (Tableau 6) :

Tableau 6 : Résultats de l'analyse de sensibilité

Esco	Alpha Bf	Cn2	GW revap	Sol AWC
1	2	3	4	5

2) Calibration des débits

La première étape consiste à ajuster le coefficient de ruissellement de surface jusqu'à ce qu'il soit en adéquation avec la valeur estimée trouvée dans la bibliographie, soit de 27% environ (cf : Thèse JB. CHARLIER). Cet ajustement se joue au niveau de trois paramètres. Le premier est le curve number (CN2 dans la table des pratiques agricoles). Ce paramètre correspond à un coefficient de ruissellement attribué à chaque type d'utilisation du sol en fonction du groupe hydrologique du sol.

Il est également possible de jouer sur les valeurs de capacité en eau des sols. La diminution de ce paramètre entraîne logiquement une augmentation du ruissellement de surface. Dans la bibliographie une valeur minimale et maximale est donnée à chaque type de sol, l'ajustement a donc consisté à faire varier les valeurs entre les valeurs extrêmes.

Un autre facteur peut également être modifié, il s'agit d'un coefficient de compensation (ESCO) qui modifie la quantité d'eau qui peut être évapotranspirée.

Lorsque l'ajustement sur le coefficient de ruissellement est acceptable, la contribution de l'écoulement souterrain peut alors être ajustée. Afin d'obtenir une bonne corrélation entre les débits, quelques paramètres ont été retouchés.

Le coefficient de recharge de la nappe (GW_revap) joue un rôle important, il détermine la quantité d'eau se déplaçant vers l'aquifère ou restant dans la zone racinaire et étant disponible pour la plante. Ainsi plus le coefficient sera fort, plus l'eau pourra se déplacer de l'aquifère vers une zone plus superficielle ou elle sera utilisable par la plante. Ces volumes ne se retrouveront donc pas à l'exutoire.

Le dernier paramètre de grande importance est le *Baseflow alpha factor*. Cet indice correspond à un facteur de rapidité de recharge du cours d'eau par l'aquifère, il permet d'ajuster les temps de réponse du bassin

On peut trouver une synthèse de la calibration de ces paramètres dans le tableau ci-dessous (Tableau 7):

Tableau 7 : Paramètres calibrés et leur valeur

Paramètres calibrés								
	Curve number	Capacité en eau des sols (mm/mm)				ESCO	GW_revap	alpha BF (jours)
		andosols	ferralsols	bruns-rouille	sols jeunes			
1e couche de sol	50	0.5	0.4	0.3	0.3	0.85	0.04	0.06
2e couche de sol		0.4	0.45	0.4	0.35			

3) Résultats

Un nombre important de simulations ainsi que d'essai de calibration ont été réalisées afin de corréliser au mieux les débits simulés des débits observés. En voici les résultats :

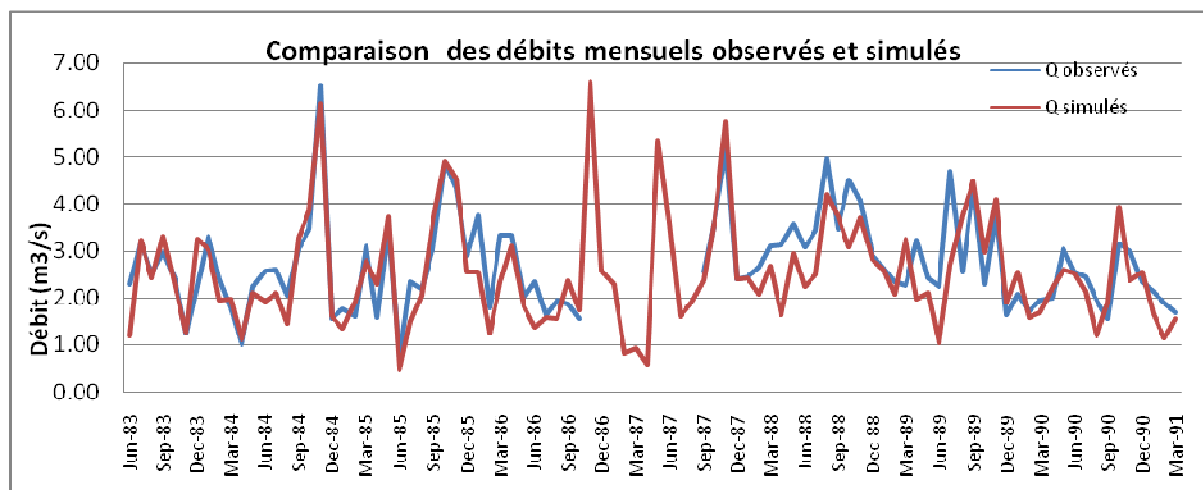


Figure 15 : Comparaison des débits mensuels observés et simulés de 1983 à 1991

Il est important de préciser que cette comparaison de débits (Figure 15) a été effectuée à l'exutoire du premier sous-bassin, sur la rivière de Capesterre et pour la période de 1983 à 1991 seulement. En effet pour la simulation des débits de ce sous-bassin le modèle utilise les précipitations quotidiennes de la station météorologique du Grand Carbet.

Cette station possède des données complètes de précipitations journalières pour la période de 1983 à 1991. Puis à partir de 1991 les données quotidiennes viennent à faire défaut pour cette station climatique. Ainsi pour une période postérieure à 1991 le modèle SWAT simule les débits à l'aide des précipitations calculées à partir des données statistiques (moyenne, écart type) et non plus des données quotidiennes.

Cela a un effet direct sur la qualité de la corrélation des débits. En effet comme on peut le voir sur la Figure 16 ci-dessous, présentant la courbe de régression linéaire de la comparaison de ces débits observés et simulés entre 1983 et 1991, le coefficient de détermination (R^2) de 0,70 reste acceptable :

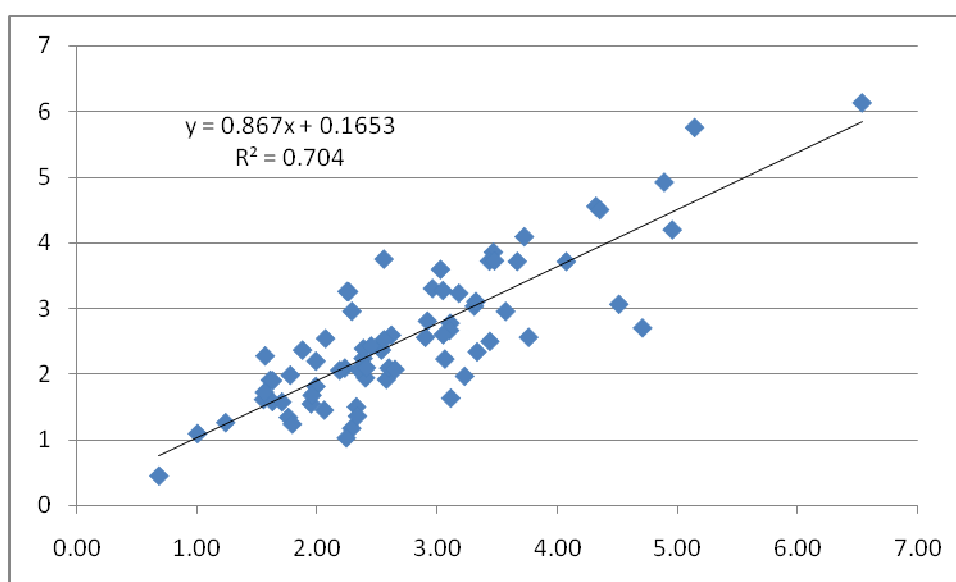


Figure 16 : Corrélation des débits mensuels observés et simulés entre 1983 et 1991

Cependant sur la seconde partie de la période de simulation, c'est-à-dire de 2000 à 2007 ce coefficient de détermination chute à 0,49.

Ceci s'explique par la moins bonne précision de la simulation qui utilise pour cette seconde période les données mensuelles de précipitations et non plus les données quotidiennes pour simuler les précipitations journalières.

Ceci prouve l'importance des données climatiques d'entrées pour la qualité de la modélisation.

La modélisation a ensuite été simulée à un pas de temps journalier sur la même période. Les résultats de corrélation des débits se sont avérés nettement moins bon.

En effet le R^2 (Figure 17) est de 0,40 contre 0,70 lors de la comparaison des débits mensuels.

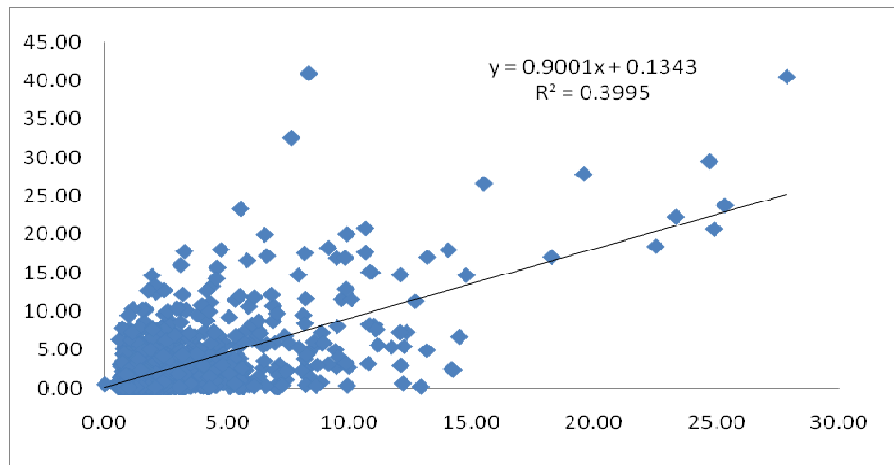


Figure 17 : Corrélation des débits journaliers pour la période de 1983 à 1994

Cependant le coefficient de détermination qui donne de bons résultats sur un pas de temps mensuel peut l'être beaucoup moins lorsque l'on passe à un pas de temps quotidien. En effet R^2 est très sensible à la corrélation temporelle des données. C'est-à-dire que pour deux courbes de débit similaire mais décalées d'une journée dans le temps, le coefficient de détermination peut chuter de manière impressionnante.

Lors d'une bonne corrélation des valeurs des débits mais d'un mauvais calage temporel, on pourrait estimer qu'une meilleure calibration du modèle permettrait d'améliorer sensiblement le coefficient de détermination. Ceci en ajustant le temps de réponse du débit de la rivière face à un épisode de pluie.

Cependant dans ce cas le problème était différent puisque bien que visuellement les courbes des débits simulés et observés aient été proches et semblaient bien refléter les périodes de crue, un léger décalage temporel s'observait. Mais ce décalage marquait parfois en temps de retard de la simulation par rapport au système et parfois un temps d'avance. On peut l'observer sur la Figure 18 qui est représentative du comportement des débits sur l'ensemble de la période de 1983 à 1993 :

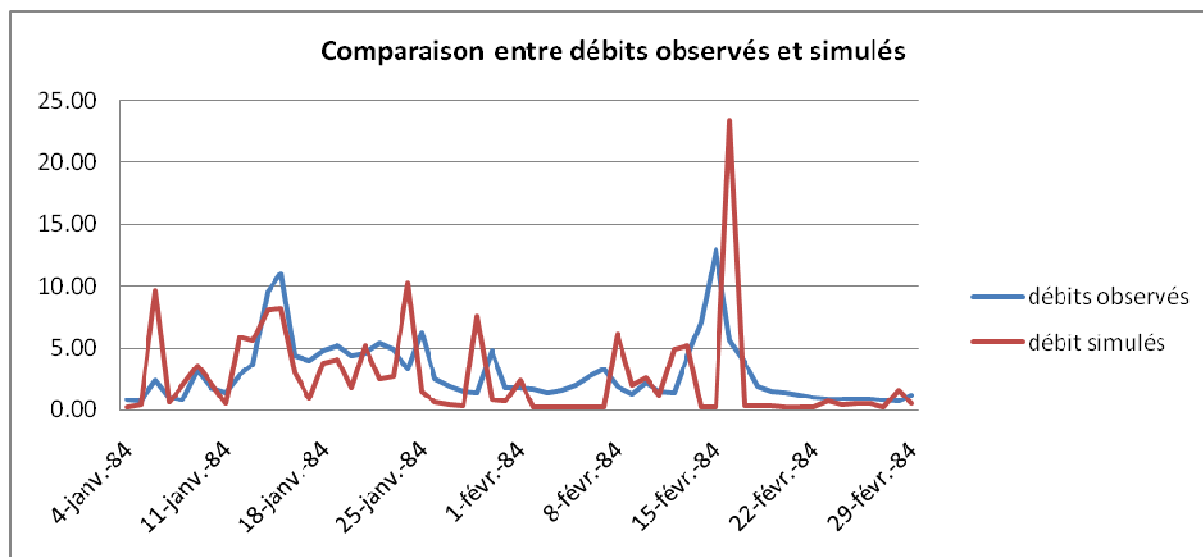


Figure 18 : Comparaison des débits journaliers observés et simulés de janvier à février 84

Dans le cas présent la calibration du modèle n'a pas été remise en cause. En effet une nouvelle calibration aurait à certaine période amélioré la simulation en recalant les pics de crue observés et simulés. Mais à d'autre période cela aurait amplifié le décalage observé. On peut expliquer ce problème par de nombreux facteur indépendant de notre volonté. Par exemple une saisie irrégulière dans les débits observés.

Au vu de ces résultats il a été choisi d'effectuer d'autres calculs de corrélation entre débits observés et simulés (voir Tableau 8).

Tableau 8 : Analyse de comparaison des débits journaliers observés et simulés (1983-1994)

nash=0.40	volume d'eau écoulé	nombre de pics de crue	volume d'eau écoulé à l'étiage	Volume d'eau écoulé en crue ($Q > 5 \text{ m}^3/\text{s}$)	écarts des Q_{max}
observation	797 $\times 10^6 \text{ m}^3$	867	481	316	2 m^3/s
simulation	736 $\times 10^6 \text{ m}^3$	1055	347	446	
concordance	92.30%	82%	72%	71%	

Ainsi, la première méthode de comparaison des débits qui a été effectuée s'est naturellement porté sur le volume d'eau total écoulé sur toute la période.

Entre 1983 et 1994, il a été observé plus de 797 millions de m^3 d'eau écoulé et le modèle a simulé un écoulement de 736 millions de m^3 d'eau environ. Ceci signifie que plus de 92,3 % de l'eau qui s'est écoulée dans la rivière de Capesterre sur cette période a bien été simulé par le modèle.

Puis l'intérêt s'est porté sur le dénombrement du nombre de pics de crue. Il s'est avéré qu'entre 1983 et 1994, 867 pics de crue ont pu être observés tandis que le modèle en a simulé 1055. Ainsi la simulation a légèrement surestimé le nombre de crue mais on peut noter une concordance de plus de 82% entre le nombre de crue observées et simulées.

Dans un second temps il a été choisi de diviser mes chroniques de débits journaliers en deux partie qui ont été analysées distinctement : l'une à l'étiage et l'autre en période de crue lorsque les débits dépassait $5 \text{ m}^3/\text{s}$.

On observe donc qu'à l'étiage 481 millions de m^3 d'eau ont été observés pour seulement 347 millions simulés, soit environ 72% de la lame d'eau qui a été bien simulée.

En crue, pour des débits dépassant $5 \text{ m}^3/\text{s}$, 316 millions de m^3 d'eau peuvent être observé tandis que le modèle en simule 446 millions soit une concordance de 71 % entre débits

simulés et observés. Dans le cas de crue le modèle surestime donc le volume d'eau écoulé. J'ai ensuite calculé l'écart entre les débits maximum observés et simulés. L'écart moyen résultant est de $2\text{m}^3/\text{s}$.

Toutes ces méthodes d'analyses ont permis d'aborder la comparaison entre débits observés et simulés d'une nouvelle manière.

En effet malgré un coefficient de détermination peu prometteur au pas de temps quotidien, il a pu être établi que la simulation mise en place sur ce bassin versant rendait compte d'une manière assez fidèle du volume d'eau écoulé ainsi que du nombre de crue observé. En regardant ces résultats à l'étiage puis en crue on observait que la simulation restait acceptable et plutôt proche de la réalité.

Validation du modèle

La validation permet de vérifier la validité de la calibration sur l'ensemble des données. En effet la calibration n'a été effectuée que sur une partie des données (lieu restreint et période limitée) et, pour être acceptée, doit donc être validée globalement.

Dans le cas présent la calibration a été menée sur les débits de la rivière de Capesterre, au niveau de l'exutoire du premier sous-bassin, et pour la période de 1983 à 1994.

La validation de la simulation s'est donc portée dans un premier temps sur le même lieu mais pour la période de 2000 à 2007. Puis dans un second temps sur un lieu différent, c'est-à-dire sur la rivière de Pérou, au niveau de l'exutoire du second sous-bassin, pour une période quasiment similaire (1987 à 1991).

Ceci a donc permis d'obtenir une double validation du modèle : une validation temporelle (même lieu que la calibration mais période différente) et une validation spatiale (période quasiment similaire que la calibration mais à un lieu différent).

1) *Validation temporelle*

L'analyse de comparaison des débits observés et simulés sur la rivière de Capesterre pour la période de 2000 à 2007 a donné les résultats suivants (Figure 19) :

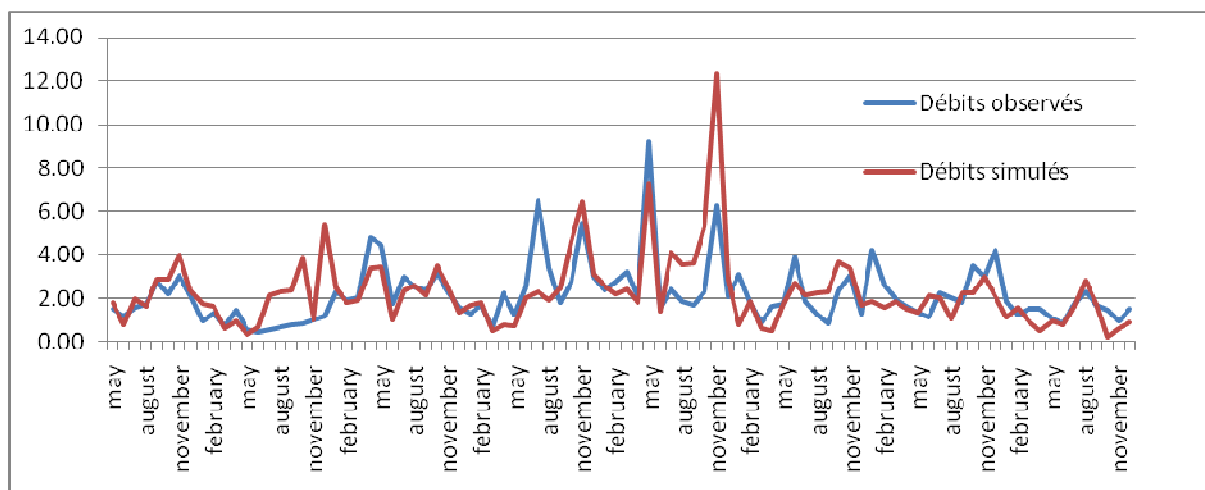


Figure 19 : Comparaison des débits observés et simulés entre 2000 et 2007 (Capesterre)

Il est important de noter que pour simuler les débits à cet endroit, SWAT s'est basé sur les valeurs de pluviométrie de la station météorologique du Grand Carbet. Or pour cette station et cette période de simulation les données de précipitation quotidienne étaient absentes. Le modèle s'est alors servi des données de moyenne mensuelle de précipitation pour simuler les pluies. Ceci engendrant donc logiquement une corrélation entre débits observés et simulés moins bonne que si les données quotidiennes de pluviométrie existaient.

Malgré cela le coefficient de détermination est resté correct mais tout de même insuffisant pour valider la simulation de manière certaine: 0, 40. L'analyse de comparaison a donc été poussée plus loin, comme déjà effectué auparavant pour la calibration des débits au pas de temps journalier.

Ainsi les calculs de volume total ont révélés que 524 millions de m³ d'eau se sont réellement écoulés entre 2000 et 2007 dans la rivière de Capesterre à cet endroit. Le modèle a simulé 539 millions de m³ soit malgré une légère surestimation une correspondance de plus de 97% entre les volumes d'eau écoulee et observée.

De plus 25 pics de crue ont été observés, tandis que le modèle en a simulé 26. Soit une bonne correspondance du nombre de pics de crue.

L'analyse de corrélation des débits quotidiens a obtenu des résultats similaires puisque le coefficient de nash a donné une valeur de 0.42.

Ces analyses de Comparaison des débits ont permis de considérer que la simulation reflétait plutôt bien la réalité en termes de débit. Cette simulation a de plus montrée la solidité du modèle SWAT qui arrive à simuler, assez fidèlement à la réalité, sept années de pluviométrie à l'aide de moyennes mensuelles et quotidiennes. Ceci a donc validé le caractère temporel de la calibration de cette simulation.

2) Validation spatiale

L'analyse de comparaison des débits observés et simulés sur la rivière du Pérou pour la période de 1987 à 1991 doit être considérée de manière prudente. Avant de comparer les débits il convient de prendre en compte le fait que les données d'observation sur cette station de mesure des débits (Figure 14) sont incomplètes et difficilement exploitable. En effet bien que des données de débits existent sur la période de 1987 à 1991 d'importantes lacunes existent. Ainsi les mois de septembre et octobre 1987, l'année 1988, le mois d'avril 1989 et toute la période allant d'août 1989 à mars 1990 sont marqués par une absence totale de données de débits(voir Tableau 5). Ceci limite donc fortement la période de corrélation les possibilités ainsi qu'une analyse critique objective.

La visualisation graphique de cette analyse était peu informative car entrecoupée par d'importantes lacunes de données. Le coefficient de détermination était quant à lui mauvais : 0.19.

Après calcul des volumes d'eau écoulés, il s'est avéré que le modèle avait simulé environ 214 millions de m³ pour 118 réellement mesurés. Soit une correspondance d'environ 55% entre les volumes d'eau simulés et observés.

Au vu de ces résultats, rien n'a permis de considérer la qualité de la corrélation des débits. En effet les débits mesurés étant incomplets il s'est avéré difficile de déterminer avec certitude si la simulation avait rendu compte d'une manière fidèle ou pas à la réalité les débits dans la rivière du Pérou.

Ainsi la validation spatiale de la calibration n'a pu être établie au niveau de cet exutoire. Si cette validation n'a pas été confirmée dans l'état actuel des données, elle n'a pas pu être contredite de manière fiable non plus. Dans le cas présent il s'agissait d'un manque de données de validation plutôt que d'une mauvaise calibration des débits.

Modélisation des transferts de nitrates et chlordécone

1) Modélisation des transferts de nitrates

Les données disponibles de concentration de la rivière en nitrates ont été fournies par la DIREN de Guadeloupe. Il s'agit de 35 mesures de 1999 à 2006 à raison de 3 à 5 mesures par an situées sur la rivière Capesterre au niveau de l'exutoire du sous-bassin n°3 (voir figure14). Ces valeurs ont été comparées aux valeurs quotidiennes simulées par le modèle et sont représentées dans la figure 20 ci-dessous :

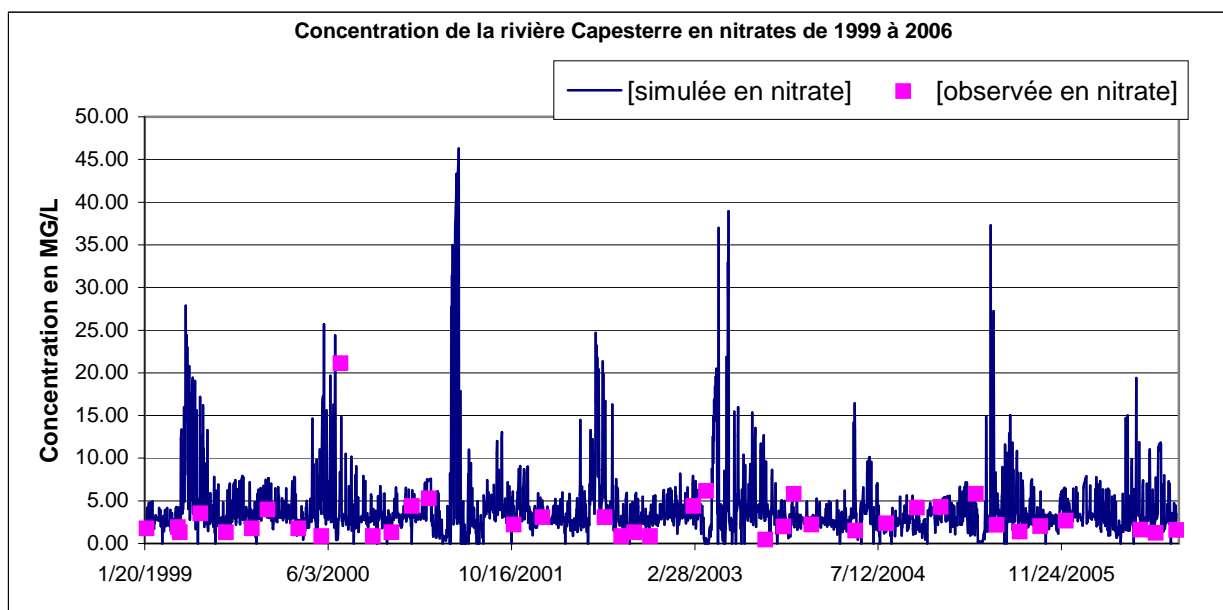


Figure 20 : Concentration en nitrates de la rivière Capesterre (1999-2006)

La qualité de corrélation de ces données dépend directement de la qualité de la simulation des débits journaliers pour cette période (R^2 de 0.42).

Ces données de teneurs en nitrates possèdent un coefficient de détermination de 0.30, soit une valeur assez proche de celle des débits.

On peut donc considérer que le modèle a plutôt bien simulé les valeurs de concentration en nitrates dans la rivière de Capesterre.

Visuellement les concentrations simulées et observées semblent avoir une allure générale assez proche.

Une seule valeur supérieure à 20 Mg/L a été mesurée le 7 août 2000 et celle-ci a été correctement simulée par le modèle.

Cependant il est important de noter les faibles concentrations des valeurs observées. Elles sont toutes inférieures à 25 Mg/L et pour la majorité inférieure à 8 Mg/L. Il aurait été intéressant de posséder une chronique de mesure des concentrations en nitrates plus fournie afin de pouvoir mener la comparaison avec la simulation plus en détails notamment lorsque les teneurs en nitrates sont supérieures à 25Mg/L.

L'analyse de ces résultats n'a volontairement pas été poussée plus loin. En effet ces résultats sont à prendre avec prudence car le faible nombre de mesures ne permet pas de rendre compte avec précision des sept années qui ont été nécessaire pour simuler les valeurs de nitrates.

2) Modélisation des transferts de chlordécone

Les données de concentrations en chlordécone étaient disponibles au niveau de l'exutoire du troisième sous-bassin sur la rivière Capesterre (voir Figure 14)) sur une période de 3 ans soit de 2003 à 2006. Fournies par la DIREN de Guadeloupe, ces concentrations ont été représentées par une série de quatorze valeurs. Elles ont été comparées aux valeurs de concentration simulées par le modèle dont voici le résultat (Figure 21)

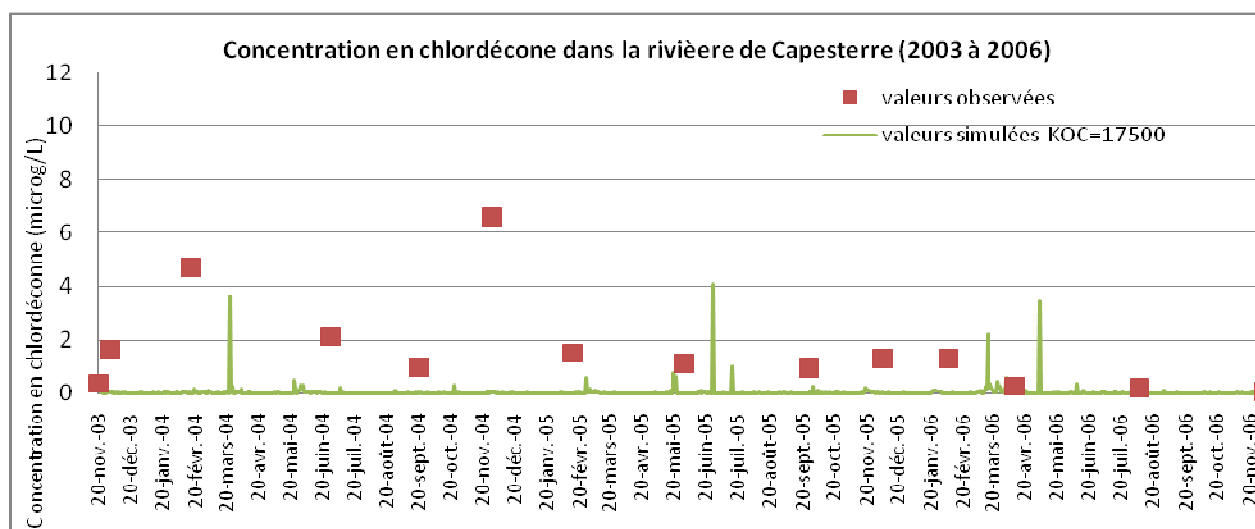


Figure 21 : Concentration en chlordécone dans la rivière Capesterre (2003-2006) KOC=17500 L/kg

Malgré le faible nombre de mesures de concentration en chlordécone observé, il est clairement apparu que la simulation ne rendait pas bien compte de la réalité. Les concentrations simulées étaient en deçà des concentrations observées. Cela peut s'expliquer par l'évolution des pratiques agricoles en matière d'utilisation de pesticide en Guadeloupe. En effet depuis 1993 l'usage de la chlordécone est strictement interdit sur l'ensemble du territoire français. Par conséquent les concentrations observées dans les rivières depuis cette date sont issues des teneurs résiduelles en chlordécone des sols, soumis au lessivage par les eaux de pluies et de drainage.

Les facteurs contrôlant les concentrations aujourd'hui observées en rivière sont donc liés à la capacité de la molécule de chlordécone à la sorption sur le carbone des sols. Le coefficient de partage (Koc) entre la fraction équivalente sorbée sur le carbone du sol et la fraction soluble dans l'eau était justement discutable dans le cas de ce pesticide.

En effet trois valeurs étaient relatées dans la bibliographie : 17500 L/kg selon Kenaga (1980), 2000 mentionnée par Bonvallot et Dor (2004), et 2500 L/kg environ selon Howard et al. (1981). La première valeur, retenue pour la simulation, donnant des valeurs loin de la réalité, la simulation a été relancée avec les valeurs citées précédemment.

Après analyses des résultats obtenus c'est la valeur de 2000 L/kg (la plus récentes) qui a été retenue pour le coefficient koc.

Un second paramètres, trouvés dans le rapport de l'INRA et du CIRAD, qui concernait la profondeur de la couche de sédiment contaminés par la chlordécone a été modifié. Sa valeur initialement nulle a été fixée à 30 centimètres.

Une nouvelle simulation a alors été lancée. Voici les résultats (Figure 22) :

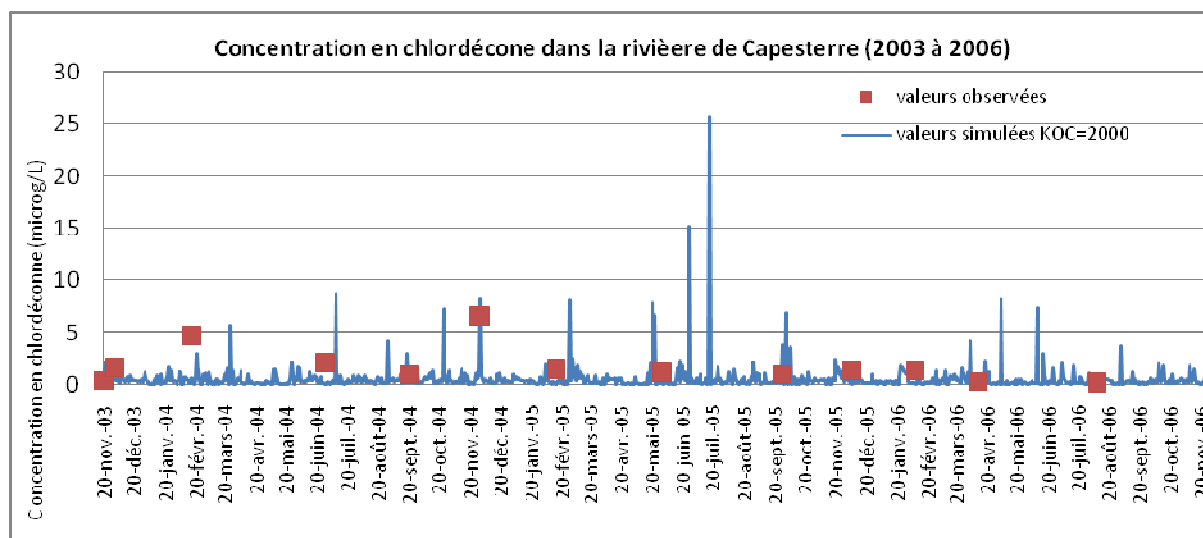


Figure 22 : Concentration en chlordécone dans la rivière Capesterre (2003-2006) KOC=2000 L/kg

Ces résultats sont apparus comme plus proches des concentrations observées. Le coefficient de détermination était de 0,53. Cependant il convient d'analyser ces résultats avec prudence. Comme pour la modélisation des flux de nitrate, les concentrations observées en chlordécone ne représentent que quelques valeurs ponctuelles par rapport à la période de simulation (14 mesures sur 3 ans).

Rien ne permet de tirer des conclusions quant à la qualité de la simulation en termes de pesticide au vue de ces résultats. Par contre ils permettent de démontrer que le facteur le coefficient de partage (Koc) entre la fraction équivalente sorbée sur le carbone du sol et la fraction soluble dans l'eau et la profondeur de contamination des sédiments jouent un rôle primordial dans la modélisation des transferts de chlordécone sur le bassin de Capesterre-Perou. Cette simulation a mise en évidence que le coefficient de partage mentionnée par Bonvallot et Dor (2004) de 2000 L/kg apparaissait plus adapter dans le cadre de transfert de la chlordécone dans les sols guadeloupéen que l'ancienne valeur de 17500 L/kg datant de 1980 (Kenaga).

Il conviendrait néanmoins d'approfondir les recherches sur cette molécule encore mal connue, afin de rendre compte d'une manière plus proche de la réalité de la contamination des sols par le chlordécone.

LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX

FIGURES :

Figure 1: Plan de situation de la Guadeloupe et des Antilles	5
Figure 2 : Pluviométrie, Carte DIREN issue du projet de SDAGE 2002.....	7
Figure 3 : Distribution des sols et de la pluviométrie dans le sud de la Basse-Terre. D'après Colmet-Daage (1969) et Chaperon et al.....	9
Figure 4 : Carte pédologique, Y.M. CABIDOCHÉ, INRA-APC 1997, d'après Atlas de la Guadeloupe, CNRS+ORSTOM, 1979	10
Figure 5 : Réseau hydrographique de la commune de Capesterre.....	12
Figure 6 : Occupation du sol, DIREN, projet de SDAGE 2002.....	14
Figure 7 : Réseau hydrographique de Capesterre-Belle-Eau	19
Figure 8 : Carte pédologique	20
Figure 9 : Carte d'occupation du sol en 2007	21
Figure 10 : Carte d'occupation du sol entre 1980 et 2000	22
Figure 11 : Carte de localisation des stations climatiques	23
Figure 12 : Sous-bassins et exutoires du modèle.....	26
Figure 13 : Principe de délimitation des HRU (Renaud, 2004, d'après Duros 2002).....	28
Figure 14 : Carte de localisation des stations de mesure	32
Figure 15 : Comparaison des débits mensuels observés et simulés de 1983 à 1991.....	35
Figure 16 : Corrélation des débits mensuels observés et simulés entre 1983 et 1991	35
Figure 17 : Corrélation des débits journaliers pour la période de 1983 à 1994.....	36
Figure 18 : Comparaison des débits journaliers observés et simulés de janvier à février 84	37
Figure 19 : Comparaison des débits observés et simulés entre 2000 et 2007 (Capesterre)	39
Figure 20 : Concentration en nitrates de la rivière Capesterre (1999-2006).....	41
Figure 21 : Concentration en chlordécone dans la rivière Capesterre (2003-2006) KOC=17500 L/kg.....	42
Figure 22 : Concentration en chlordécone dans la rivière Capesterre (2003-2006) KOC=2000 L/kg.....	43

TABLEAUX :

Tableau 1 : Disponibilité des données climatiques.....	24
Tableau 2 : Moyenne et écart-type des paramètres climatiques de la station de Neufchâteau (1997-2007)	25
Tableau 3 : Précipitation annuelle des stations climatique du Grand Carbet et Capesterre-Belle-Eau (1983-1995)	25
Tableau 4 : Distribution des HRU	29
Tableau 5 : Disponibilité des mesures de débit et qualité de l'eau.....	33
Tableau 6 : Résultats de l'analyse de sensibilité.....	33
Tableau 7 : Paramètres calibrés et leur valeur.....	34
Tableau 8 : Analyse de comparaison des débits journaliers observés et simulés (1983-1994)	37

BIBLIOGRAPHIE

Sol :

- SANSOULET J., 2007, *Transfert d'eau et des ions potassium et nitrate dans un sol à capacité d'échange anionique sous un couvert redistributeur de la pluie, étude expérimentale et modélisation dans une bananeraie fertilisé sur un andosol*, Th D Sol-plante-atmosphère, Institut National Agronomique Paris-Grignon .
- DOREL M., ROGER-ESTRADE J. *Porosité et propriétés hydriques des sols volcaniques de la Guadeloupe ; Rôle des constituants du sol Porosity and hydric properties of volcanic ash soils ; Role of soils components.*
- Ndayiragije S., 1996. *Caractérisation d'une séquence d'altération de sols dérivés de matériaux pyroclastiques sous climat tropical humide des Antilles (Guadeloupe).*
- Quantin P., 1972. *Les Andosols - Revue bibliographique des connaissances actuelles. Cah. ORSTOM, série Pédol., 10, (3) : 273-302.*
- Colmet-Daage F., Lagache P., 1965. *Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. Cah. ORSTOM sér. pédol. 8, (2): 91-121.*
- Ndayiragije S., DELVAUX B., 2004, *Selective sorption of potassium in a weathering sequence of volcanic ash soils from Guadeloupe, French West Indies*, Université catholique de Louvain, Belgique, Catena 56 (2004) 185–198.
- DOREL M., *Effets des pratiques culturales sur la porosité physiques des sols volcaniques de Guadeloupe et influence sur l'enracinement du bananier*, Th. D. Sciences agronomiques et ingénierie biologique, Université catholique de Louvain.
- KHAMSOUK B., *Influence des systèmes de culture bananière sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments en Martinique (sol brun rouille à halloysite)*, Th. D. de l'ENSA Montpellier (science du sol), 28 juin 2001.
- ISRIC World Soil Information

Hydrologie et pesticide en Guadeloupe :

- Chaperon, P., l'Hôte, Y. and Vuillaume, G., 1985. *Les ressources en eau de surface de la Guadeloupe. Coll. Monographies hydrologiques. Editions de l'ORSTOM, tome 1 : 449 p, tome 2 : 834 pp.*
- Ibiza, D., 1983. *Un modèle simplifié de calcul des écoulements mensuels par bilan hydrique. Application : variation de quelques paramètres hydrologiques d'après l'aspect des bassins. Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, XX(1).*
- Y-M. Cabidoche, M. Jannoyer, H. Vannière, Juin 2006, *Conclusions du Groupe d'Etude et de Prospective « Pollution par les organochlorés aux Antilles » Aspects agronomiques*, INRA+CIRAD.
- Comité de Bassin de la Guadeloupe, *Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux*, Adopté par le Comité de bassin le 19 juin 2003, Approuvé par le Préfet le 25 juillet 2003.

- Y-M. Cabidoche et al., *Stockage dans les sols à charges variables et dissipation dans les eaux de zoocides organochlorés autrefois appliqués en bananeraies aux Antilles :relation avec les systèmes de culture*, rapport final d'exécution, mai 2006.

Culture (banane, canne à sucre) :

- DOREL M., *Effets des pratiques culturales sur la porosité physiques des sols volcaniques de Guadeloupe et influence sur l'enracinement du bananier*, Th. D. Sciences agronomiques et ingénierie biologique, Université catholique de Louvain.
- LASSOUDIERE A., *Le bananier et sa culture*, édition QUAE, juin 2007.
- *Manuel technique de la canne à sucre*, CTICS.
- *Manuel technique de la banane*, CTICS.

Occupation du sol passée:

- DULCIRE M., CATTAN P., *Monoculture d'exportation et développement agricole durable. Cas sur la banane en Guadeloupe*, Cahiers agriculture 2002, 11 :313-21.
- AMORAVAIN V., *Analyse du système agraire sur un bassin versant bananier en Guadeloupe*, mémoire du diplôme d'ingénieur en agriculture de l'ISARA, 17 octobre 2000.
- JULIEN D., *Diagnostic du bassin versant du Perou (Guadeloupe)*, ENSA Toulouse, 6 septembre 2000.

Fonctionnement du logiciel SWAT, mise en place du modèle :

- NEITSCH S.L., ARNOLD J.G., KINIRY J.R., SRINIVASAN R., WILLIAMS J.R., *Soil and Water Assessment Tool, INPUT/OUTPUT file documentation, version 2005*, septembre 2004.
- NEITSCH S.L., ARNOLD J.G., KINIRY J.R., WILLIAMS J.R., *Soil and Water Assessment Tool, Theoretical documentation, version 2005*, janvier 2005.
- WINCHELL M., SRINIVASAN R., DI LUZIO M., ARNOLD J., *ArcSWAT 2.0 Interface for SWAT2005, User's guide*, février 2008.

Autres exemples de l'utilisation du modèle SWAT en milieu tropical :

- SCHUOL J., ABBASPOUR K.C., SRINIVASAN R., YANG H., 2007, *Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model*, Journal of Hydrology (2008) 352, 30– 49.
- ASSOC.PROF. HANSA VATHANANUKIJ, D.ENG., RM-GIS TEAMWORK, *Sustention model for water resource management, Water Resource Engineering Department, Faculty of Engineering, Kasetsart University*

- BEHERA S., PANDA R.K., *Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process based model*, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 113, Issues 1-4, April 2006, Pages 62-72

Annexe 1 : Fiches de sols

SOL BRUN ROUILLE

<u>Paramètres du sol</u>		
NLAYERS	2	nombre de couche de sol
HYDGRP	B	
SOL ZMX	800 mm	maximum de profondeur racinaire du profil de sol

<u>Paramètres des couches du sol</u>		1: 1ere couche ; 2: 2ème couche
SOL_Z	1 : 350 2 : 800	mm profondeur de la surface du sol au mur de la couche
SOL_BD	1 : 2.5 2 : 2.5	g/cm ³ masse volumique humide
SOL AWC	1 : 0.3 2 : 0.4	mm/mm capacité d'eau disponible dans la couche du sol
SOL CBN	1 : 1.78 2 : 0.59	% teneur en carbone organique
SOL K	1 : 27.6 2 : 27.6	mm/h conductivité hydraulique à saturation
CLAY	1 : 80 2 : 80	% teneur en argile
SILT	1 : 14 2 : 15.6	% teneur en vase
SAND	1 : 6 2 : 4.4	% teneur en sable
SOL ALB	1 : 0.14 2 : 0.14	albédo sur sol humide
USLE K	1 : 0.1 2 : 0.1	facteur K de l'équation USLE d'érodabilité des sols

ANDOSOL

Paramètres du sol

NLAYERS	2	nombre de couche de sol
HYDGRP	B	
SOL ZMX	600 mm	maximum de profondeur racinaire du profil de sol

Paramètres des couches du sol

1: 1ere couche ; 2: 2ème couche

SOL_Z	1 : 250 2 : 600	mm	profondeur de la surface du sol au mur de la couche
SOL_BD	1 : 2.41 2 : 2.5	g/cm ³	masse volumique humide
SOL AWC	1 : 0.4 2 : 0.5	mm/mm	capacité d'eau disponible dans la couche du sol
SOL CBN	1 : 5.58 2 : 2.55	%	teneur en carbone organique
SOL K	1 : 25 2 : 25	mm/h	conductivité hydraulique à saturation
CLAY	1 : 62 2 : 67	%	teneur en argile
SILT	1 : 32 2 : 24	%	teneur en vase
SAND	1 : 6 2 : 9	%	teneur en sable
SOL ALB	1 : 0.1 2 : 0.1		albédo sur sol humide
USLE K	1 : 0.1 2 : 0.1	facteur K de l'équation USLE d'érodabilité des sols	

FERRALSOL

<u>Paramètres du sol</u>		
NLAYERS	2	nombre de couche de sol
HYDGRP	B	groupe hydraulique du sol
SOL ZMX	2000 mm	maximum de profondeur racinaire du profil de sol

<u>Paramètres des couches du sol</u>		1: 1ere couche ; 2: 2ème couche
SOL_Z	1 : 400 2 : 2000 mm	profondeur de la surface du sol au mur de la couche
SOL_BD	1 : 2 2 : 2 g/cm ³	masse volumique humide
SOL AWC	1 : 0.4 2 : 0.45 mm/mm	capacité d'eau disponible dans la couche du sol
SOL CBN	1 : 2.75 2 : 1.32 %	teneur en carbone organique
SOL K	1 : 487.2 2 : 487.2 mm/h	conductivité hydraulique à saturation
CLAY	1 : 12 2 : 43 %	teneur en argile
SILT	1 : 8 2 : 5 %	teneur en vase
SAND	1 : 80 2 : 52 %	teneur en sable
SOL ALB	1 : 0.15 2 : 0.15	albédo sur sol humide
USLE K	1 : 0.1 2 : 0.1	facteur K de l'équation USLE d'érodabilité des sols

LEPTOSOL

Paramètres du sol

NLAYERS	2	nombre de couche de sol
HYDGRP	B	groupe hydraulique du sol
SOL ZMX	600 mm	maximum de profondeur racinaire du profil de sol

Paramètres des couches du sol

1: 1ere couche ; 2: 2ème couche

SOL_Z	1 : 300 2 : 600	mm	profondeur de la surface du sol au mur de la couche
SOL_BD	1 : 2.38 2 : 2.5	g/cm ³	masse volumique humide
SOL AWC	1 : 0.3 2 : 0.35	mm/mm	capacité d'eau disponible dans la couche du sol
SOL CBN	1 : 10 2 : 4.91	%	teneur en carbone organique
SOL K	1 : 26 2 : 26	mm/h	conductivité hydraulique à saturation
CLAY	1 : 53.6 2 : 65	%	teneur en argile
SILT	1 : 27.5 2 : 26.1	%	teneur en vase
SAND	1 : 18.7 2 : 8.9	%	teneur en sable
SOL ALB	1 : 0.1 2 : 0.1		albédo sur sol humide
USLE K	1 : 0.1 2 : 0.1		facteur K de l'équation USLE d'érodabilité des sols

Annexe 2 : Fiches de culture

BANANE

BIO_E	20	(kg/ha)/(MJ/m ²)	moyenne de biomasse sèche produite par unité de radiation solaire interceptée
HVSTI	0.4		fraction de biomasse qui est récoltée durant la moisson
BLAI	4		
DLAI	0.75		
			Indice foliaire potentiel maximum
			fraction de la saison de croissance quand le LAI commence à chuter
CHTMX	2	m	
RDMX	0.5	m	
			hauteur max de la canopée
			profondeur max des racines
T_OPT	27		
T_BASE	14		
			température optimale pour la croissance de la plante (°C)
			température minimale pour la croissance de la plante (°C)
CNYLD	0.0505	kg N / kg rendement	
CPYLD	0.004	kg P / kg rendement	
			fraction d'azote dans la biomasse après moisson
			fraction de phosphore dans la biomasse après moisson
BN1, 2, 3	0.0524, 0.0265, 0.258	kg N / kg biomasse	
BP1, 2, 3	0.0074, 0.0037, 0.0035	kg N / kg biomasse	
			fraction d'azote dans la plante à l'émergence (1), à 50% de maturité (2) et à maturité (3)
			fraction de phosphore à l'émergence (1), à 50% de maturité (2) et à maturité (3)
WSYF	0.3	(kg/ha)/(kg/ha)	
			fraction minimale de biomasse récoltée après moisson du à un stress hydrique
USLE_C	0.2		valeur minimum du facteur d'érosion hydrique USLE C
GSI	0.006	m/s	conductance stomatale maximum à fort taux d'insolation et faible pression de vapeur
RSDCO	0.05		Fraction des résidus qui seront décomposés en un jour en supposant des conditions optimales
ALAI_MIN	0	m ² /m ²	indice d'aire foliaire minimum pour la plante durant la période de dormance

FORET TROPICALE

BIO_E	15	(kg/ha)/(MJ/m ²)	moyenne de biomasse sèche produite par unité de radiation solaire interceptée
HVSTI	0.001		fraction de biomasse qui est récoltée durant la moisson
BLAI	4		
DLAI	1		
			Indice foliaire potentiel maximum
			fraction de la saison de croissance quand le LAI commence à chuter
CHTMX	20	m	
RDMX	2.5	m	
			hauteur max de la canopée
			profondeur max des racines
T_OPT	30		
T_BASE	15		
			température optimale pour la croissance de la plante (°C)
			température minimale pour la croissance de la plante (°C)
CNYLD	0.0015	kg N / kg rendement	
CPYLD	0.003	kg P / kg rendement	
			fraction d'azote dans la biomasse
			fraction de phosphore dans la biomasse
BN1, 2, 3	0.006, 0.002, 0.0015	kg N / kg biomasse	
BP1, 2, 3	0.0007, 0.0004, 0.0003	kg N / kg biomasse	
			fraction d'azote dans l'arbre à l'émergence (1), à 50% de maturité (2) et à maturité (3)
			fraction de phosphore à l'émergence (1), à 50% de maturité (2) et à maturité (3)
WSYF	0	(kg/ha)/(kg/ha)	
			fraction minimale de biomasse récoltée après moisson du à un stress hydrique
USLE_C	0.001		valeur minimum du facteur d'érosion hydrique USLE C
GSI	0.002	m/s	conductance stomatale maximum à fort taux d'insolation et faible pression de vapeur
RSDCO	0.05		Fraction des résidus qui seront décomposés en un jour en supposant des conditions optimales
ALAI_MIN	0	m ² /m ²	indice d'aire foliaire minimum pour a l'arbre

ANANAS

BIO_E	30	(kg/ha)/(MJ/m ²)	moyenne de biomasse sèche produite par unité de radiation solaire interceptée
HVSTI	0.36		fraction de biomasse qui est récoltée durant la moisson
BLAI	8		
DLAI	0.75		
			Indice foliaire potentiel maximum
			fraction de la saison de croissance quand le LAI commence à chuter
CHTMX	1.2	m	
RDMX	0.3	m	
			hauteur max de la canopée
			profondeur max des racines
T_OPT	28		
T_BASE	14		
			température optimale pour la croissance de la plante (°C)
			température minimale pour la croissance de la plante (°C)
CNYLD	0.0015	kg N / kg rendement	
CPYLD	0.001	kg P / kg rendement	
			fraction d'azote dans la biomasse après moisson
			fraction de phosphore dans la biomasse après moisson
BN1, 2, 3	0.01, 0.004, 0.0024	kg N / kg biomasse	
BP1, 2, 3	0.0075, 0.003, 0.0019	kg N / kg biomasse	
			fraction d'azote dans la plante à l'émergence (1), à 50% de maturité (2) et à maturité (3)
			fraction de phosphore à l'émergence (1), à 50% de maturité (2) et à maturité (3)
WSYF	0.15	(kg/ha)/(kg/ha)	
			fraction minimale de biomasse récoltée après moisson du à un stress hydrique
USLE_C	0.1		valeur minimum du facteur d'érosion hydrique USLE C
GSI	0.003	m/s	conductance stomatale maximum à fort taux d'insolation et faible pression de vapeur
RSDCO	0.05		Fraction des résidus qui seront décomposés en un jour en supposant des conditions optimales
ALAI_MIN	0	m ² /m ²	indice d'aire foliaire minimum pour la plante durant la période de dormance